

Устойчивость транспортировки электронного пучка в камере генератора электронно-пучковой плазмы

Р. Н. Ризаханов, А. А. Бармин, Р. И. Рудштейн

Рассмотрены и проанализированы физические процессы, возникающие при транспортировке электронного потока, создаваемого импульсным генератором электронно-пучковой плазмы и выводимого в плотную газовую среду посредством системы шлюзов с дифференциальной откачкой и прожигаемыми перегородками. Предложены аналитические критерии, связывающие параметры выводной системы и устанавливающие условия, при которых обеспечивается устойчивая транспортировка пучка и высокий ресурс генератора для случаев с использованием фокусирующего магнитного поля и в его отсутствие.

Ключевые слова: пучок электронов, транспортировка пучка, магнитное поле.

Ссылка: Ризаханов Р. Н., Бармин А. А., Рудштейн Р. И. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 42.
Reference: R. N. Rizakhanov, A. A. Barmin, and R. I. Rudshstein, Prikl. Fiz., No. 6, 42 (2019).

Введение

Важной проблемой при работе генератора электронно-пучковой плазмы (ГЭПП) является обеспечение устойчивой транспортировки пучка. Наиболее остро данная проблема стоит в камерах с высоким давлением газа. В ГЭПП на основе системы дифференциальной откачки наибольшее давление устанавливается в последней, т. н. приатмосферной, шлюзовой камере [1].

В малогабаритных ГЭПП транспортировка пучка осуществляется сквозь прожигаемый им же тракт. В исходном состоянии перегородки, разделяющие камеры, являются целыми, при этом в откачиваемых объемах устанавливается вакуум [2]. При пуске пучка в

перегородках прожигаются минимально необходимые отверстия, и в камерах устанавливается некоторое распределение давлений (см. рис. 1) – от внешнего P_0 до внутреннего P_n , где n – число шлюзов. Ясно, что наибольшее давление P_1 , а значит и наибольшее влияние на пучок оказывается в последней перед выходом в окружающую среду камере [3].

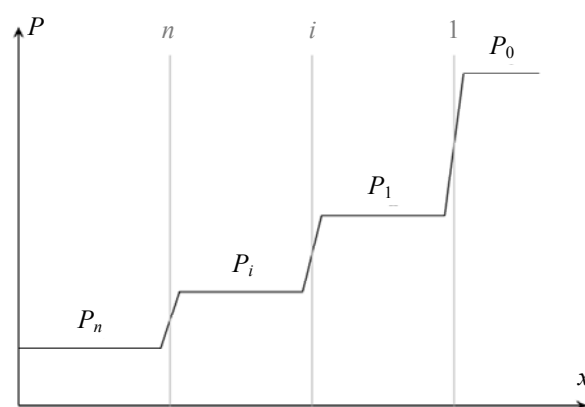


Рис. 1. Распределение давлений газа в шлюзовых камерах при выводе электронного пучка в газовую атмосферу.

В ходе многочисленных работ по генерации пучковой плазмы в воздухе атмосферного давления было установлено, что при каждом включении пучка диаметр отверстия,

Ризаханов Ражудин Насрединович, нач. отдела,
к.ф.-м.н.

Бармин Александр Александрович, в.н.с., к.т.н.

Рудштейн Роман Ильич, н.с., к.ф.-м.н.

Исследовательский Центр им. М. В. Келдыша
(ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»).

Россия, 125438, Москва, ул. Онежская, 8.

E-mail: rn_rizakhanov@kerc.msk.ru;

nanocentre@kerc.msk.ru; rudshstein@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26 июня 2019 г.

© Ризаханов Р. Н., Бармин А. А., Рудштейн Р. И., 2019

прожигаемого в перегородке выходной шлюзовой камеры, становится всё больше. Механизм этого явления состоит в том, что при каждом последующем включении пучка давление P_1 в шлюзовой камере оказывается больше, чем при предыдущем пуске, вследствие чего происходит уширение пучка из-за рассеяния.

Необходимо подчеркнуть, что в данной работе рассматривается импульсный режим работы ГЭПП с малой длительностью импульса. Под каждым «запуском» генератора будем подразумевать подачу короткого импульса, при котором характерное время прожигания разделяющей перегородки (образования в ней нового отверстия большего размера) оказывается существенно меньше времени протекания газодинамических процессов, приводящих к установлению равновесия давлений газа в соседних откачиваемых шлюзах. Иными словами, в рассматриваемом случае допустимо считать, что прожигание перегородки происходит практически мгновенно, после чего генератор сразу же отключается, и только затем давление газа (концентрация молекул) в соседних шлюзах начинает изменяться. Новые установившиеся значения параметров газовой среды окажут влияние на характер рассеяния пучка при последующем запуске генератора. Такой подход позволяет рассматривать электрофизическую и газодинамическую задачи независимо, что в значительной степени упрощает описание протекающих физических процессов.

Целью данной работы является подробное рассмотрение и анализ физических процессов, возникающих при транспортировке электронного потока, создаваемого импульсным генератором электронно-пучковой плазмы и выводимого в плотную газовую среду посредством системы шлюзов с дифференциальной откачкой и прожигаемыми перегородками.

Анализ физических процессов

Для анализа указанных процессов рассмотрим камеру (см. рис. 2), которая первоначально откакумирована. Пучок радиусом r_0 (из предыдущей камеры с давлением P_i) проходит расстояние L и прожигает в перегородке Π отверстие радиусом r_0 . Для исследования поведения системы при последующих включениях пучка сделаем следующие допущения:

- прожигаемое в перегородке Π отверстие имеет диаметр, равный диаметру луча в сечении перегородки;
- на рассматриваемом участке пренебрегается потерями энергии электронов;
- отверстие в перегородке, расположенной при $z = 0$, не увеличивается, так как в предыдущей шлюзовой камере давление P_i чрезвычайно мало;
- концентрация рассеивающих центров (молекул газа) в объеме камеры однородна;
- исходный пучок состоит из электронов, первоначально направленных вдоль оси z (иными словами, начальный эмиттанс пучка равен нулю).

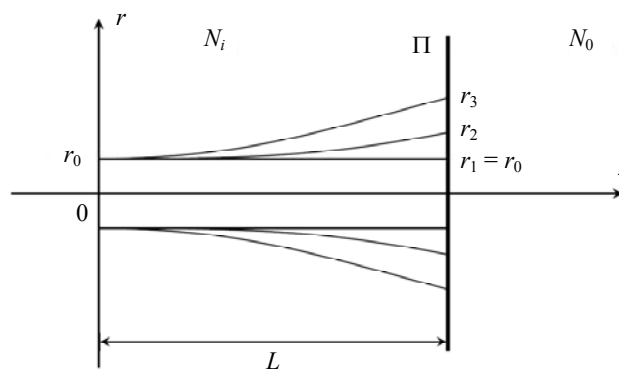


Рис. 2. Схема прожигания электронным пучком отверстия в шлюзовой перегородке.

В рамках сделанных предположений в отсутствие магнитного поля радиус пучка в рассеивающей среде, согласно [4], меняется по закону

$$r^2 = r_0^2 + \frac{1}{3} T z^3, \tag{1}$$

где

$$T = \frac{8\pi r_e^2 Z(Z+1)N}{\gamma^2 \beta^4} \ln \frac{60\pi\gamma\beta}{Z^{1/3}}. \tag{2}$$

При этом r_e – классический радиус электрона; Z – атомный номер рассеивающей частицы; N – концентрация частиц; γ , β – релятивистские факторы электронов.

Газовая проводимость отверстия радиусом r при больших перепадах давления, в соответствии с [5, 6], равна

$$U = Ar^2, \tag{3}$$

где A – коэффициент, имеющий размерность скорости и зависящий от характеристик газа.

В частности, для воздуха при нормальной температуре $A = 640$ м/с.

Если концентрация атомов окружающего газа давлением P_0 равна N_0 , то в камере, сообщаемой с ним через отверстие в перегородке П с проводимостью U , концентрация атомов будет

$$N = \frac{U}{V} N_0, \quad (4)$$

где V – скорость откачки камеры.

Рассмотрим динамику системы при последовательных включениях пучка.

Исходное состояние. В перегородке отверстие отсутствует, в камере – вакуум.

Первый пуск. Пучок прожигает в перегородке отверстие радиусом $r_1 = r_0$ (рис. 2), после включения пучка проводимость этого отверстия будет $U_1 = Ar_1^2$, концентрация атомов $N_1 = N_0 U_1 / V$, параметр $T_1 = T_0 A r_1^2 / V$, где T_0 определяется из (2) при $N = N_0$.

Второй пуск. Пучок распространяется в рассеивающей среде в соответствии с (1), его радиус в сечении перегородки П ($z = L$) станет (см. рис. 2) равным

$$r_2^2 = r_0^2 + \frac{1}{3} T_1 L^3 = r_0^2 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{AT_0}{V} L^3 \right).$$

После отключения пучка установятся следующие параметры:

концентрация

$$N_2 = \frac{AN_0}{V} r_2^2 = \frac{AN_0}{V} r_0^2 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{AT_0}{V} L^3 \right),$$

параметр T_2

$$T_2 = \frac{T_0}{N_0} N_2 = \frac{T_0 A}{V} r_0^2 \left(1 + \frac{1}{3} \frac{AT_0}{V} L^3 \right).$$

Третий пуск. Пройдя путь в среде с «рассеивающим фактором» T_2 , пучок в сечении перегородки приобретет радиус

$$r_3^2 = r_1^2 + \frac{1}{3} T_2 L^3 = r_0^2 \left[1 + \frac{1}{3} \frac{AT_0}{V} L^3 + \left(\frac{1}{3} \frac{AT_0}{V} L^3 \right)^2 \right].$$

Продолжая эту процедуру, после $n+1$ включений имеем значение радиуса:

$$r_{n+1}^2 = r_0^2 (1 + Q + Q^2 + \dots + Q^n) = r_0^2 \frac{Q^{n+1} - 1}{Q - 1}, \quad (5)$$

$$\text{где } Q = \frac{1}{3} \frac{AT_0}{V} L^3.$$

Критерий устойчивой работы генератора

Возможны следующие случаи.

Случай 1: $Q \geq 1$.

В соответствии с (5), радиус отверстия с каждым включением становится все больше и больше, без ограничения. Иными словами, установка будет иметь ресурс, определяемый числом включений. В частности, если $Q = 1$, то после $n+1$ включений имеем соотношение

$$r_{n+1}^2 = r_0^2 (n+1),$$

т. е. после конечного числа включений отверстие в перегородке станет настолько большим, что откачные средства будут уже не способны обеспечить требуемый перепад давлений в системе дифференциальной откачки. Ресурс ГЭПП ограничится указанным числом включений, при этом чем больше Q , тем меньше возможное число включений.

Случай 2: $Q < 1$.

Соблюдение данного условия является важным при создании генератора электронно-пучковой плазмы, предназначенного для длительной эксплуатации. Здесь также каждый пуск сопровождается увеличением размера отверстия, прожигаемого пучком в перегородке. Однако, в отличие от случая 1, здесь существует предел в формуле (5) – радиус отверстия не будет превышать величину

$$r_\infty = \frac{r_0}{\sqrt{1-Q}}, \quad (6)$$

какое бы число пусков не было осуществлено.

Это означает, что можно ввести безразмерный параметр Q , который, например, для воздуха выражается через параметры пучка в виде

$$Q = \frac{5359Z(Z+1)r_e^2 N_0}{\gamma^2 \beta^4} \ln \frac{60\pi\beta\gamma L^3}{Z^{1/3} V}, \quad (7)$$

где все единицы приведены в системе СИ.

Очевидно, что для обеспечения устойчивой работы ГЭПП необходимо соблюдение критерия

$$Q < 1. \quad (8)$$

Если внешней средой является воздух при нормальных условиях, а энергия электронов равна 100 кэВ (т. е. $Z = 7,2$; $\beta\gamma = 0,655$; $N_0 = 5,37 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$, в последнем учтено, что воздух состоит из двухатомных молекул), то критерий устойчивой работы преобразуется к виду

$$L < \frac{V^{1/3}}{16,3}.$$

Так, при скорости откачки $V = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ для устойчивой работы ГЭПП длина последней камеры L должна быть заметно меньше $2,9 \times 10^{-2} \text{ м}$.

Если соблюдение данного условия вызывает конструкционные сложности, то возможно наложение магнитного поля, которое должно препятствовать расплыванию пучка и, как результат, снизить размеры прожигаемых в перегородках отверстий.

Влияние магнитного поля на устойчивость работы генератора

Представляет практический интерес влияние магнитного поля на устойчивость работы ГЭПП.

Для простоты анализа предположим, что реализуется согласованная транспортировка пучка и его огибающая описывается выражением [4], кроме того, справедливы соотношения (1)–(4), описывающие изменения параметров при пусках. Тогда после прохождения в камере расстояния L в рассеивающей среде радиус пучка (а, следовательно, радиус созданного им в перегородке отверстия) равен

$$r^2 = r_0^2 + \frac{T}{2q^2}L - \frac{T}{4q^3}\sin 2qL, \quad (9)$$

где $q = \frac{eB_{z0}}{2m_0c\beta\gamma}$ – характеристика магнитного поля с индукцией B_{z0} .

Как и выше, предполагается, что в исходном состоянии в камере имеется глубокий вакуум и при первом пуске в перегородке об-

разуется отверстие радиусом $r_1 = r_0$ (транспортировка – согласованная). Сообщение с внешней средой приведет к тому, что перед вторым пуском в камере будет некоторая концентрация рассеивающих частиц N_1 , при этом $T_1 = T_0N_1/N_0$. После второго пуска пучок увеличит радиус отверстия до значения

$$r_2^2 = r_0^2(1 + R),$$

где

$$R = \frac{T_0AL}{2Vq^2} \left(1 - \frac{\sin 2qL}{2qL} \right). \quad (10)$$

При отверстии радиуса r_2 в камере возрастает концентрация частиц до величины N_2

$$N_2 = \frac{AN_0}{V}r_2^2 = \frac{AN_0}{V}r_0^2(1 + R),$$

при этом

$$T_2 = \frac{AT_0}{V}r_2^2 = \frac{AT_0}{V}r_0^2(1 + R).$$

Следующий третий пуск увеличит размер отверстия до величины

$$r_3^2 = r_0^2 + r_1^2R = r_0^2(1 + R + R^2).$$

Соблюдаются те же закономерности, что и в случае без магнитного поля, но безразмерный параметр R , определяющий критерий устойчивой работы, имеет вид (10), а сам критерий записывается как

$$R < 1. \quad (11)$$

При соблюдении этого условия радиус отверстия в перегородке не будет превышать величину

$$r_\infty = \frac{r_0}{\sqrt{1 - R}}.$$

В отличие от условий устойчивости, задаваемых системой (7), (8), система (10), (11) является трансцендентной относительно L , но разрешается относительно V . В большинстве практически важных случаев на длине L укладывается большое число пульсаций огибающей пучка, поэтому $qL \gg 1$, тогда в скобках в формуле (10) можно оставить только единицу.

Если внешней средой является воздух атмосферного давления, энергия электронов равна 100 кэВ, напряженность магнитного поля равна 0,3 Тл, то критерий (11) примет вид:

$$L < 2,73V,$$

т. е. при скорости откачки $V = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ длина камеры должна быть менее 0,27 м. Это условие существенно облегчает конструкционную реализацию камеры и обеспечивает повышение устойчивости работы ГЭПП при использовании магнитных полей.

Оптимальная скорость откачки камеры

В заключение целесообразно привести формулы для скорости откачки камеры, обеспечивающей длительную устойчивую работу генератора электронно-пучковой плазмы:

– в отсутствие магнитного поля

$$V > \frac{8,37AZ(Z+1)r_e^2N_0L^3}{\gamma^2\beta^4} \ln \frac{60\pi\beta\gamma}{Z^{1/3}}, \quad (12)$$

– при наложении внешнего магнитного поля

$$V > \frac{12,55AZ(Z+1)r_e^2N_0L}{\gamma^2\beta^4q^2} \times \left(1 - \frac{\sin 2qL}{2qL}\right) \ln \frac{60\pi\beta\gamma}{Z^{1/3}}, \quad (13)$$

где A характеризует проводимость отверстия и зависит от сорта газа и его температуры.

Следует отметить, что при $qL \ll 1$ формула (13) переходит в (12).

Заключение

В рамках данной работы рассмотрены и проанализированы физические процессы, возникающие при транспортировке электронного потока, создаваемого импульсным генератором электронно-пучковой плазмы и выводимого в плотную газовую среду посредством системы шлюзов с дифференциальной откачкой и прожигаемыми перегородками. На основе аналитического решения параксиального

уравнения Ли-Купера, описывающего огибающую электронного пучка, установлены закономерности явления уширения пучка при каждом последующем запуске генератора. Проанализированы различные случаи транспортировки и установлены условия, при которых размер прожигаемого в перегородке отверстия (радиус сечения пучка) с ростом числа запусков приближается к конечному предельному значению вместо своего неограниченного увеличения.

На основе проведенного анализа сформированы аналитические критерии устойчивой транспортировки пучка и обеспечения высокого рабочего ресурса генератора, связывающие параметры выводной системы, для случаев с наложением внешнего фокусирующего магнитного поля ($R < I$) и в его отсутствие ($Q < I$). Также приведены формулы, позволяющие оценить оптимальную скорость откачки шлюзовой камеры, обеспечивающей длительную устойчивую работу генератора электронно-пучковой плазмы.

В частности, показано, что в воздушной среде при нормальных условиях при начальной энергии электронов 100 кэВ и скорости откачки камеры (последнего шлюза выводной системы) $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ в отсутствие внешнего магнитного поля для устойчивой работы генератора длина камеры не должна превышать $2,9 \times 10^{-2}$ м. При аналогичных условиях, но в присутствии магнитного поля с индукцией 0,3 Тл длина камеры должна составлять не более 0,27 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иевлев В. М., Коротеев А. С. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1981. № 3. С. 3.
2. Ризаханов Р. Н. // Прикладная физика. 2007. № 4. С. 71.
3. Горшков О. А., Ильин А. А., Ловцов А. С., Ризаханов Р. Н. // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 2. С. 162.
4. Ризаханов Р. Н. // Прикладная физика. 2007. № 1. С. 47.
5. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1990.
6. Фролов Е. С., Минайчев В. Е. Вакуумная техника. Справочник. – М.: Машиностроение, 1992.

Electron beam transportation stability in the electron-beam plasma generator chamber

R. N. Rizakhanov, A. A. Barmin, and R. I. Rudshtein

Keldysh Research Center
8 Onezhskaya st., Moscow, 125438, Russia
E-mail: rn_rizakhanov@kerc.msk.ru; nanocentre@kerc.msk.ru; rudshtein@gmail.com

Received June 26, 2019

Physical processes occurring during the transportation of electron flow created by pulsed electron beam plasma generator and outputted into dense gaseous medium through system of gateways with differential pumping and burning partitions are considered and analyzed. Analytical criterion have been proposed that relates parameters of the output system and determines conditions under which stable beam transportation and high generator life are ensured for cases using focusing magnetic field and in its absence.

Keywords: electron beam, electron beam transport, magnetic field.

REFERENCES

1. V. M. Ievlev and A. S. Koroteev, *Izv. RAN. Energetika*, No. 3, 3 (1981).
2. R. N. Rizakhanov, *Prik. Fiz.*, No. 4, 71 (2007).
3. O. A. Gorshkov, A. A. Il'in, A. S. Lovtsov, R. N. Rizakhanov. *Instruments and Experimental Techniques* **46** (2), 123 (2003).
4. R. N. Rizakhanov, *Prik. Fiz.*, No. 1, 47 (2007).
5. L. N. Rozanov, *Vacuum Technology*. (Moscow, Vys. Shkola, 1990) [in Russian].
6. E. S. Frolov and V. E. Minajchev. *Vacuum Technology. Handbook* (Moscow, Mashinostroenie, 1992) [in Russian].