

ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

А. Г. ВЛАСОВ, В. П. ПОНОМАРЕВ, М. Т. ШИВЫРТАЛОВ, П. М. ЩАНИН

Общие положения

Проблема создания вакуумных систем электронных ускорителей и получение в них достаточно низкого давления представляет собой довольно сложную задачу. От решения этой проблемы зависят эксплуатационные характеристики и эффективность работы ускорителя.

Основным элементом вакуумной системы ускорителя является вакуумная камера. Размеры поперечного сечения и радиус камеры являются производными межполюсного пространства электромагнита и радиуса равновесной орбиты, величина которых зависит от принципа ускорения, энергии ускоренных электронов и т. п. Материал, из которого изготавливается камера, должен удовлетворять ряду требований [1].

1. Обладать достаточной механической прочностью, препятствующей разрушению камеры от атмосферного давления.

2. Обладать хорошими вакуумными свойствами, т. е. быть газонепроницаемым и иметь малую сорбционную способность.

3. Стенки камеры не должны искажать магнитное поле в межполюсном пространстве.

Исходя из этих требований, камеры ускорителей могут изготавливаться как из диэлектрика — стекла, фарфора, керамики, пластмассы, а также и из металлов при выполнении условий, обеспечивающих минимальную величину возникающих вихревых токов. Выбор того или иного материала камеры производят исходя из конкретных условий. Для электронных циклических ускорителей на энергии до 25—30 Мэв вакуумные камеры изготавливают обычно цельными (бесшовными) из молибденового стекла ЗС-5 или фарфора. Для ускорителей на энергию 100 Мэв и выше размеры камеры получают значительные, и ее приходится изготавливать из отдельных секторов с последующей их склейкой.

В том случае, когда магнит ускорителя имеет разрез и верхняя часть магнита может быть поднята для установки камеры, то камера склеивается из секторов и в дальнейшем является неразборной. Такая камера изображена на рис. 1 и обычно изготавливается для ускорителей на энергии, не превышающие 200—300 Мэв.

Магниты ускорителей на энергии больше 300 Мэв в большинстве случаев изготавливаются в виде буквы „С“ и не имеют разреза. Кроме

того, камеры этих ускорителей настолько велики по диаметру, что изготовление их неразборными является нецелесообразным. Поэтому для таких ускорителей вакуумные камеры необходимо изготавливать разборными. Отдельные части разборной камеры склеиваются из секторов и соединяются с помощью фланцев с прокладкой из вакуумной резины.

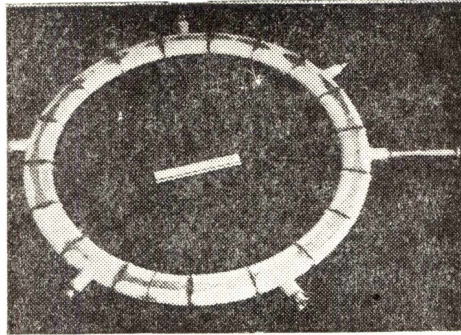


Рис. 1. Неразборная камера бетатрона на 100 Мэв.

Поперечное сечение камер может быть либо овальным, либо прямоугольным с закруглением острых углов и должно как можно полнее охватывать межполюсное пространство.

Внутренняя поверхность вакуумной камеры должна быть достаточно проводящей, чтобы предотвратить накопление зарядов вследствие выхода частиц из ускорения и осаждения их на стенки камеры. В противном случае возникающие электростатические поля привели бы к отклонению и рассеянию ускоряемого пучка.

На выбор величины сопротивления проводящего покрытия накладываются два противоположных условия.

1. Сопротивление проводящего покрытия должно быть достаточно малым, чтобы заряды успевали стечь со слоя за время одного оборота электронов.

2. Сопротивление слоя должно быть не меньше минимально-допустимой величины, чтобы в нем не наводились большие вихревые токи.

Аналитическое выражение первого условия затруднительно. Практически, если сопротивление покрытия велико, это условие можно выполнить путем заземления на нескольких азимутах.

Выполнение второго условия необходимо для того, чтобы вихревые токи, наведенные переменным магнитным полем, были малы и не искажали основное магнитное поле ускорителя, а также не нагревали стенку камеры. Исходя из этого условия, величина удельного сопротивления непрерывного равномерного проводящего покрытия, т. е. покрытия, не имеющего электрического разрыва по окружности, может быть определена по выражению [2]

$$\rho = \frac{8 \cdot 10^{-9} \pi R_0^2 \dot{H}_{oi}}{\Delta n h \cdot H_{oi}} \quad (1)$$

При наличии электрического разрыва в проводящем покрытии по окружности камеры основное поле ускорителя в области равновесной орбиты из-за вихревых токов заметно не нарушается, а искажения, в основном, происходят на краях сечения камеры, т. е. в области, удаленной от равновесной орбиты. В этом случае минимально допустимое удельное сопротивление проводящего покрытия определится [2]

$$\rho = \frac{16 \cdot 10^{-9} \pi a R_0^2 \dot{H}_{oi}}{\Delta n h \cdot H_{oi}} \quad (2)$$

Здесь H_{oi} , \dot{H}_{oi} — напряженность магнитного поля и скорость его роста на равновесной орбите в момент инжекции в гауссах,

- a — радиальный полуразмер поперечного сечения ускорительной камеры в сантиметрах,
 R_0 — радиус равновесной орбиты в сантиметрах,
 h — высота межполюсного пространства на радиусе равновесной орбиты в сантиметрах,
 Δn — допустимое отклонение показателя спадания магнитного поля по радиусу.

Для того, чтобы электроны не терялись из-за рассеяния на остаточном газе в процессе ускорения в камере, необходимо создать высокий вакуум. Расчеты и эксперименты, проводимые по исследованию влияния давления в вакуумной камере на интенсивность излучения ускорителя, показывают, что для нормальной работы ускорителя в камере должно быть такое давление, при котором потери электронов из-за рассеяния на остаточном газе не должны превышать 5—6%. Исходя из этого, рабочее давление в вакуумной камере в мм рт. ст. может быть определено из следующего выражения [3, 4]

$$P_p = \frac{nb^2 T_i eVT^\circ \eta}{2\pi^2 R_0^3 n_2 z_2^2 e^4 \ln \frac{180 b \sqrt{n} (\gamma_0^2 - 1)^{1/2}}{R_0 z_2^{1/3}}}, \quad (3)$$

- где n — показатель спадания магнитного поля,
 b — полуразмер вакуумной камеры в аксиальном направлении в сантиметрах,
 T_i — энергия инжекции в электроновольтах,
 eV — энергия, приобретаемая электроном за оборот в электроновольт/оборот,
 T° — температура газа, заполняющего камеру в градусах Кельвина,
 η — 0,06 — коэффициент, определяющий 5% потерь из-за рассеяния,
 R_0 — радиус равновесной орбиты в сантиметрах,
 $n_2 z_2$ — число атомов в молекуле газа, заполняющего камеру и его атомный номер,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}.$$

При определении рабочего давления учтено как однократное, так и многократное рассеяние и потери из-за радиальных и аксиальных колебаний коэффициентом „4“, так как выражение (3) без этого коэффициента справедливо только для многократного рассеяния в аксиальном направлении. Введение этого коэффициента дает неопределенность на 5—10%, что вполне допустимо для данного расчета. Упругое и неупругое рассеяние учитывалось при определении величины η . Расчеты и практика эксплуатации ускорителей показывают, что давление в вакуумной камере должно быть порядка $1-5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Для создания такого давления в камере служит второй основной элемент вакуумной системы ускорителей — откачная система. В качестве откачной системы обычно используются диффузионные паромасляные насосы, спаренные с форвакуумными насосами и соединенные с вакуумной камерой и друг с другом системой трубопроводов и вентиляций. В последнее время вместо диффузионных насосов все чаще и чаще начинают использоваться ионно-сорбционные насосы, так как они не засоряют камеру парами масла, а это очень важно при длительной работе ускорителей.

Ниже будет рассмотрен расчет откачной системы и технология изготовления вакуумной системы ускорителей.

Откачная система вакуумной камеры

При расчете вакуумной системы для создания вакуума в камере ускорителей заряженных частиц, если известно рабочее давление, необходимо определить:

1. Расположение высоковакуумных насосов и их скорости откачки.
2. Скорость откачки форвакуумных насосов.
3. Сечение трубопроводов, соединяющих форвакуумные и высоковакуумные насосы.

Сечение трубопроводов, соединяющих высоковакуумные насосы с камерой, и расположение форвакуумных насосов обычно выбираются из конструктивных соображений и удобства эксплуатации системы. Ввиду того, что при расчете трудно учесть все факторы, влияющие на скорость газовыделения и натекания, а также окончательные размеры элементов вакуумной системы, скорости откачки высоковакуумных и форвакуумных насосов необходимо выбирать с некоторым запасом по сравнению с рассчитанными.

При молекулярном течении газа (при давлениях порядка $1 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) расчет вакуумной системы ведется на откачку газов и паров, поступающих в вакуумную камеру за счет газовыделения и натекания. Так как длина камеры обычно значительно больше ее поперечного сечения, то она будет иметь сопротивление потоку газа, вследствие чего будет создаваться перепад давлений между местом откачки и точкой, находящейся на некотором расстоянии от нее.

Пренебрегая дугообразностью вакуумной камеры, последнюю можно представить в виде прямолинейного трубопровода длиной

$$L = 2\pi r_{cp} + ml, \quad (4)$$

где r_{cp} — средний радиус квадранта,
 l — длина прямолинейного участка,
 m — число прямолинейных участков.

Сопротивление камеры овального сечения может быть определено, как сопротивление трубопровода прямоугольного сечения, равного по площади поперечному сечению камеры

$$Z = \frac{\Pi x}{61,8\kappa A^2}, \quad (5)$$

где Π — периметр сечения камеры,
 A — площадь поперечного сечения камеры,
 κ — коэффициент, зависящий от соотношения сторон приведенного прямоугольника.

Значение κ можно определить по формуле Клаузинга [5]

$$\kappa = \frac{3}{8} \frac{1+r}{r^2} \left\{ r \ln (r + \sqrt{1+r^2}) + r^2 \ln \frac{1 + \sqrt{1+r^2}}{r} + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} \left[1 - r^3 - (1+r^2)^{3/2} \right] \right\},$$

где $r = \frac{b_1}{a_1}$ — отношение сторон приведенного прямоугольника,
 x — длина рассматриваемого участка камеры.

На бесконечно малом участке камеры dx (рис. 2) перепад давлений будет равен

$$dP = Q_x dz, \quad (6)$$

где Q_x — поток газа, проходящий через сечение камеры на расстоянии x от места откачки и определяемый по формуле

$$Q_x = q\Pi(L_1 - x), \quad (7)$$

где L_1 — расстояние между местом откачки и точкой, наиболее удаленной от места откачки,

q — удельное газовыделение и натекание камеры (натекание камеры за единицу времени с единицы поверхности).

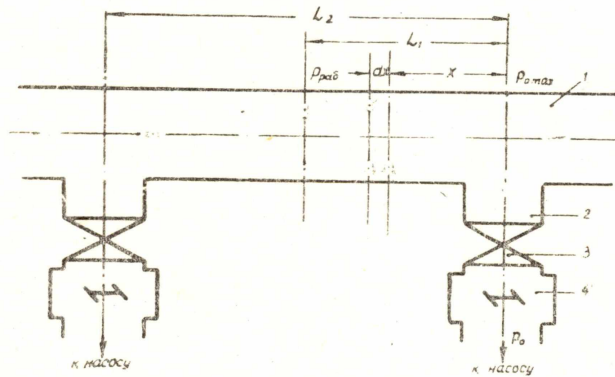


Рис. 2. Схема вакуумной системы. 1—вакуумная камера, 2—патрубок, 3—затвор, 4—ловушка.

Подставляя значение Q_x и dz в формулу (6), после интегрирования получим значение перепада давлений на отрезке x

$$\Delta P_x = P_x - P_0 = \frac{q \Pi^2 L_1^2}{61,8 \kappa A^2} \left[\frac{x}{L_1} - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{L_1} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

При $x = L_1$ максимальный перепад давлений в камере будет равен

$$\Delta P_{max} = P_{0max} - P_p = \frac{\Pi^2 L_1^2 q}{2 \cdot 61,8 \kappa A^2}. \quad (9)$$

Из последнего выражения видно, что для того, чтобы получить в камере заданное давление P_p , необходимо в месте откачки получить давление не хуже P_{0max} . Отсюда расстояние между насосами должно быть равно

$$L_2 = 2L_1 = \frac{2A}{\Pi} \sqrt{\frac{123,6 \kappa \cdot (P_{0max} - P_p)}{q}} \quad (10)$$

и число насосов было не меньше

$$N = \frac{2n r_{cp} + ml}{L_2} \quad (11)$$

Чтобы на входе откачного патрубка создать давление не выше чем $P_{оmax}$, необходимо камеру откачивать со скоростью

$$S_o = \frac{Q}{N} = \frac{2\Pi q}{P_{оmax}} \sqrt{123,6 \cdot \kappa \frac{P_{оmax} - P_p}{q}}, \quad (12)$$

где Q — скорость натекания и газовыделения, приведенная к давлению $P_{оmax}$.

Обычно насос присоединяется к камере не непосредственно, а через промежуточные элементы (патрубок, затвор, ловушка и т. д.), поэтому при расчете необходимо учитывать сопротивление этих элементов. Тогда предельное давление, создаваемое насосом, должно быть

$$P_o = P_{оmax} - \Delta P_{эл}, \quad (13)$$

где $\Delta P_{эл}$ — перепад давлений в промежуточных элементах, а скорость откачки высоковакуумных насосов определится как

$$S_n = \frac{1}{\frac{1}{S_o} - Z_{эл}}, \quad (14)$$

где $Z_{эл}$ — сопротивление элементов, соединяющих камеру с высоковакуумными насосами. После расчета производительности высоковакуумных насосов выбирается их тип.

Расположение и число форвакуумных насосов обычно выбираются из конструктивных соображений и удобства эксплуатации. При этом необходимо, чтобы в месте присоединения форвакуумной системы к выхлопному патрубку высоковакуумных насосов создавалось давление не ниже их выходного давления $P_{вых}$. Это условие выполняется, если скорость откачки в месте входа в высоковакуумные насосы будет равна

$$S_{\phi} = \frac{Q}{NP_{вых}} \quad (15)$$

При молекулярно-вязкостном режиме течения газов пропускная способность трубопровода определяется из выражения

$$u_{\phi} = \frac{u_{таб} \cdot l_{таб}}{l_{\phi}}, \quad (16)$$

где $u_{таб}$ — пропускная способность трубопровода диаметра „Д“ и длиной $l_{таб} = 1$ м. Значения $u_{таб}$ приводятся в [6]. Необходимая скорость откачки форвакуумного насоса будет равна

$$S_{n\phi} = \frac{2S_{\phi}}{1 - \frac{2S_{\phi}}{u_{\phi}}} \quad (17)$$

Из условия (17) выбирается тип насоса. Однако условие (17) является необходимым, но не достаточным для выбора форвакуумного насоса.

Вторым условием является время, в течение которого в вакуумной камере устанавливается давление, необходимое для включения высоковакуумных насосов. Это время определяется из уравнения

$$t = \frac{1}{2} \frac{V}{S_{эфф}} \ln \frac{P_a}{P_b}, \quad (18)$$

где V — объем всей системы,
 P_a — атмосферное давление,
 P_b — давление в камере, при котором включаются высоковакуумные насосы,

$$S_{эфф} = \frac{S_n}{1 + \frac{S_n}{u_{эф}}}$$

— эффективная скорость откачки,
 S_n — предельная скорость откачки форвакуумных насосов при атмосферном давлении.

Время откачки должно быть не более 15 — 20 минут. Учитывая это условие, возможен окончательный выбор типа форвакуумных насосов.

Технология изготовления вакуумной камеры

Удовлетворению требований, предъявляемых к вакуумным системам, должна соответствовать технология изготовления ускорительной камеры. Здесь рассмотрим технологию изготовления сборной ускорительной камеры как наиболее сложной в изготовлении. Изготовление других камер будет подобным. Технология изготовления камер разбивается на ряд операций.

Пришлифовка секторов камеры

Секции, из которых состоит камера, выкладываются на расчерченную по размерам камеры плиту сборочного стола. Плита стола изготавливается из гипса, листового пластика или металла с последующей обработкой. Собранный стол должен обладать необходимой жесткостью и тщательно отnivelирован. Торцы секторов, предназначенные для склейки, тщательно шлифуются друг к другу. Шлифовка ведется на чугунном диске шлифовального станка при помощи корундового или карборундового порошка зернистостью 100 — 150. На острых краях торцов делаются закругления $R_3 = 0,5$ мм.

Покрытие секторов проводящим слоем

Проводящим слоем могут быть как металлические, так и неметаллические покрытия, наносимые различными методами. Проводящее покрытие должно удовлетворять следующим требованиям.

1. Иметь величины сопротивления, близкие к расчетным.
2. Обладать достаточной механической прочностью.
3. Должно быть равномерным по поверхности камеры.
4. Не разрушаться при электронной бомбардировке.
5. Быть стабильным во времени.
6. Иметь хорошие вакуумные свойства.

Этим требованиям в некоторой мере удовлетворяют следующие покрытия: аквадаг, химически осажденное серебро, металлизирован-

ное покрытие путем вакуумного испарения и покрытие пленкой двуокиси олова. Наибольшее применение получили аквадаг и пленка двуокиси олова. Общим требованием, необходимым для успешного осуществления покрытия любого вида, является чистота покрываемой поверхности сектора. Электрическое соединение проводящих слоев отдельных секторов друг с другом производится через полоски медной фольги, припаиваемые к полосам вожженного серебра. Нанесение проводящих покрытий разными методами хорошо освещены в литературе и здесь приводить не будем [1,7—10].

Склейка камеры

После покрытия проводящим слоем сектора камеры устанавливаются на тележках, расположенных на направляющих сборочного стола. На секции одеваются хомуты с тандерами для сжатия при склейке (рис. 3). Секции выравниваются таким образом, чтобы соприкосновение было по всей плоскости торцов, после чего закрепляются винтами в тележках и подготавливаются для нанесения клея. Подготовка предусматривает очистку торцов спиртом. На торцы секций наносится клей БФ-4 в 10—12 слоев. При нанесении клея каждый слой подсушивается на воздухе в течение 10—15 мин. Помещение, где наносится слой, должно иметь низкую влажность воздуха. После нанесения всех слоев клей высушивается в течение 18—20 часов. Общая толщина нанесенного клея после просушки должна быть 0,8—1,0 мм. С внутренней стороны клей на ширине 3—4 мм снимается,

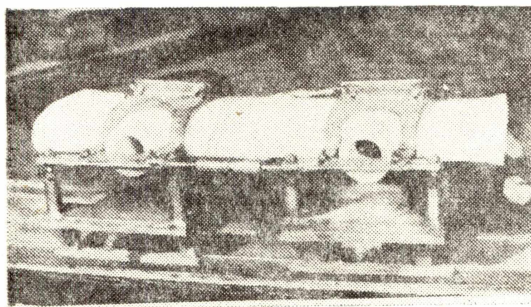


Рис. 3. Приспособление для склейки камеры.

чтобы он не мог попасть на внутреннюю поверхность камеры. К полоске вожженного серебра припаиваются мягким припоем полоски медной фольги шириной 5 мм и толщиной 0,05 мм и вводятся между склеиваемыми торцами по большой оси сечения. После этого склеиваемые торцы сближаются и на швы одеваются специальные электрические печи. Для полимеризации клея в течение 50—60 минут температура поднимается до 80—90°C. При достижении этой температуры производится стягивание секций тандерами с давлением 5—6 кг/см². Дальнейшее повышение температуры идет со скоростью 26—28°C в час с одновременной подтяжкой секций. При достижении температуры 150—160°C внутри шва повышение температуры прекращается и шов выдерживается при этой температуре в течение 2,5—3 часов. Снижение температуры производится со скоростью 60—70°C в час до 60°C, после чего печи снимаются и шов охлаждается на воздухе. Процесс полимеризации клея длится в общей сложности 7—8 часов. Таким же образом происходит приклеивание дуралюминиевых фланцев. При выполнении указанной технологии швы после склейки, как правило, не текут.

Появление течи может быть обусловлено следующими причинами:

1. Неточная шлифовка секций.
2. Плохо высушенный клей.
3. Слабая затяжка при склейке.

Впервые подобная технология склейки применена в ФИАНе.

Следует также отметить, что часть секторов камеры должна иметь патрубки, необходимые для помещения датчиков и приемников системы индикации, мишеней и т. д. К этим патрубкам также приклеиваются дуралюминиевые фланцы.

Собранная камера испытывается на общее натекание, а также определяются места течи. Швы с большой течью переклеиваются. Небольшие течи ликвидируются путем покрытия шва нитроэмалью или эпоксидной смолой.

Рассчитанные, изготовленные и испытанные по вышеописанной методике вакуумные системы, как показала практика эксплуатации, хорошо работают и обеспечивают нормальную работу ускорителей электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов А. Г., Изв. ТПИ, 87, 1957.
2. F. K. Goward, M. A. T. D. Lawson, BA, T.T. Wilkins, B. Sc. and R. Carruthers, B. Sc, Associate member, Proc. I EE, 97, 108, 320, 1950.
3. Власов А. Г., Изв. вузов, Физика, № 1, 1961.
4. Власов А. Г., Влияние давления в вакуумной камере на интенсивность излучения ускорителей, ЖТФ, 31,613 (1961).
5. Гутри А. и Уокерлинг Р., Вакуумное оборудование и вакуумная техника, ИЛ, 1957.
6. Яккель Р. Получение и измерение вакуума, ИЛ, 1952.
7. Жуков В. А. и Евтеев Ф. Е., Технология радиоаппаратуры, ГЭИ, 1952.
8. Кузнецов А. Я., Круглов А. В., Крыжановский Б. П., Заводская лаборатория, № 8, 993, 1956.
9. Кузнецов А. Я., Заводская лаборатория, № 1, 90, 1957.
10. Крыжановский Б. П., Кузнецов А. Я., ПТЭ, № 4, 76, 1958.