

ЛАБОРАТОРНАЯ  
ТЕХНИКА

ВАКУУМНАЯ ОТКАЧКА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© 2006 г. В. В. Пархомчук, В. Б. Рева, Б. А. Скарбо

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11*  
Поступила в редакцию 10.06.2005 г.

Приведены результаты предварительных вакуумных испытаний электронного охладителя для накопителя ионов свинца LEIR (CERN) с электронным пучком, проведенных в ИЯФ СО РАН. Показано, что после обезгаживания коллектора электронный пучок способствует улучшению вакуума в установке.

PACS: 07.30.-t, 29.27.a

ВВЕДЕНИЕ

Светимость встречных ион-ионных столкновений в установке LHC (CERN) во многом будет определяться качеством подготовленных сгустков ионов свинца. Каждые 3.6 с накопитель LEIR, входящий в инжекционную цепь, подготавливает  $1.0 \cdot 10^{10}$  ионов свинца  $^{54}\text{Pb}$  для последующего их ускорения и перепуска в протонный синхротрон PS. Требуемые продольный и поперечный эмиттансы ионного пучка в накопителе LEIR обеспечиваются при помощи установленной в нем системы электронного охлаждения [1, 2].

Ускорение высокозарядных тяжелых ионов накладывает серьезные ограничения на содержание остаточных газов в накопителе. Такие ионы обладают очень высоким коэффициентом десорбции при попадании на стенку вакуумной камеры. Один ион, попавший на стенку вакуумной камеры, может освобождать до  $10^4$ – $10^5$  атомов абсорбированного газа. Ухудшение вакуумных условий в кольце приводит к уменьшению времени жизни ионов и увеличению потока частиц на стенку, что способствует “взрывному” характеру роста потерь в пучке.

Требуемый рабочий вакуум в установке не хуже  $10^{-12}$  Торр. Пусть потери составляют 1% от полного числа инжектированных частиц. В этом случае со стенок вакуумной камеры будет десорбироваться до  $3 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$  атомов газа, что при скорости откачки  $10^3 \text{ л/с}$  увеличит плотность остаточного газа на  $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  ( $p = 10^{-12}$  Торр).

Электронный пучок установки электронного охлаждения вносит дополнительный вклад в нагрузку на вакуумную систему. Поглощение тока 1 А в водоохлаждаемом коллекторе при коэффициенте десорбции  $10^{-7}$  может освобождать до  $6.7 \cdot 10^{11}$  атомов, что сравнимо или даже больше газового выделения от ионного пучка. Потери электронов на участке между пушкой и коллектором также ведут

к ухудшению вакуумных условий. Несмотря на то, что они малы по абсолютной величине ( $10^{-4}$ – $10^{-7}$  от полного тока), коэффициент десорбции газов в основной вакуумной камере существенно выше и может достигать значения 0.01. Это связано с тем, что интенсивный поток электронов в коллекторе позволяет максимально быстро обезгаживать коллектор и очистить его поверхность от остаточного газа. Подобная обработка всей поверхности вакуумного объема невозможна по техническим причинам.

УСТРОЙСТВО ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАДИТЕЛЯ

Система высоковакуумной откачки установки электронного охлаждения состоит из двух ионных насосов и системы нераспыляемых геттеров для поглощения газа из вакуумной камеры [1]. По проекту два геттера находятся около пушки и коллектора, два в камерах тороидов и два на прямолинейном участке охлаждения длиной 2.5 м. В описываемых экспериментах вакуумная система не была укомплектована полностью. Не были установлены геттерные насосы на участке охлаждения, а в тороидах использовались ранее уже неоднократно работавшие геттерные блоки. В этих испытаниях не ставилась задача получения высокого вакуума, а испытывалась оптика электронной пушки и коллектора. Но даже установленных геттерных блоков после их прогрева и активации хватило для достижения вакуума на уровне  $3 \cdot 10^{-10}$  Торр. При этом основной компонентой остаточных газов вакуумной системы охладителя являлся водород. Типичный спектр остаточных газов, измеренный при помощи масс-спектрометра RGA Prisma фирмы Pfeiffer Vacuum Technology, показан на рис. 1.

Особенностью данной установки электронного охлаждения является использование электро-

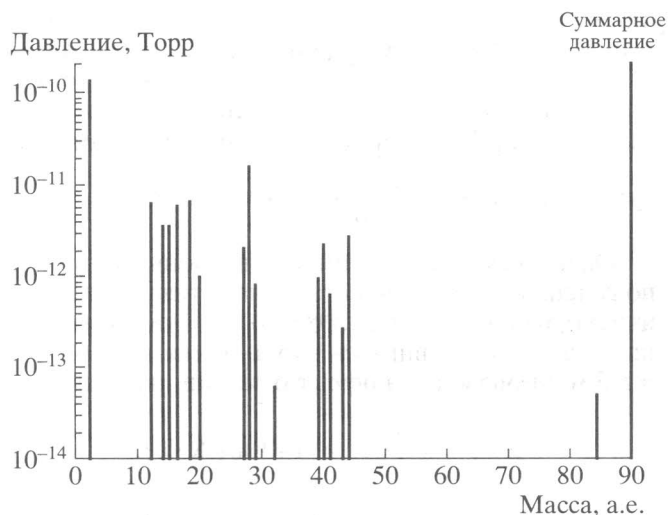


Рис. 1. Типичный спектр остаточных газов.

статических пластин для поворота электронного пучка. Это позволяет добиться того, что электроны, которые не попали в коллектор, могут пройти путь от катода до коллектора и обратно, и еще раз вернуться к коллектору и осесть на нем. Этого невозможно добиться в схеме с магнитным поворачивающим полем, где движение электронов первичного пучка и отраженных от коллектора электронов существенно различно. Последние успевают значительно сместиться в поперечном направлении на участке коллектор – пушка. Описанная схема позволяет практически полностью подавить потери электронного пучка на стенки вакуумной камеры [2, 3].

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЛИЯНИЮ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА ВАКУУМ

После окончания прогрева и активации катода включение электронного тока вело к сильному ухудшению вакуума даже при токах 5–10 мА. Это было связано с дегазацией электронным пучком внутренней поверхности коллектора электронного пучка. При токе 50 мА и суммарной скорости откачки ионных насосов и геттеров на уровне 1000 л/с давление остаточного газа составило  $10^{-7}$  Торр, что соответствует коэффициенту десорбции в коллекторе  $10^{-2}$ . Скорость откачки геттерами оценивалась в предположении полного поглощения газового потока внутри апертуры поглотителя ( $\varnothing = 90$  мм). После двух недель тренировки электронным пучком поверхности коллектора удалось ее очистить до такой степени, что включение электронного тока даже улучшало вакуум. Как показано на рис. 2, включение электронного тока в период времени 0–100 с приводит к откачке вакуумного объема до давления

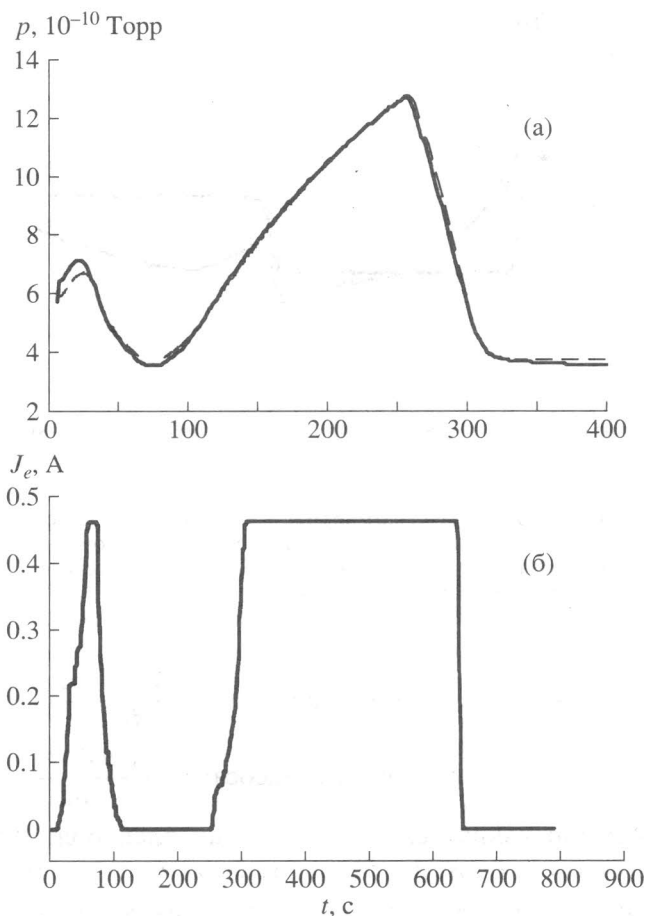


Рис. 2. а – зависимость давления  $p$  в вакуумной камере от времени: сплошная линия – измеренное значение, пунктирная – вычисленное из уравнения (1); б – зависимость от времени тока  $J_e$  электронного пучка при исследовании влияния пучка на вакуум в установке электронного охлаждения.

$p = 4 \cdot 10^{-10}$  Торр. При выключении электронного тока в момент времени  $t = 100$  с за время 150 с давление возрастает до  $p = 1.2 \cdot 10^{-9}$  Торр вследствие термодесорбции молекул со стенок вакуумной камеры. Включение электронного тока в момент  $t = 260$  с вновь приводит к снижению давления в камере до  $p = 4 \cdot 10^{-10}$  Торр.

Такие динамические испытания позволяют в простейшей модели оценить параметры вакуумной системы. Пусть газ в объеме прибора состоит из двух компонент: первая хорошо откачивается геттерами, а вторая – ионными насосами. Тогда динамика давления второй компоненты описывается уравнением

$$\frac{dp_2}{dt} = -\frac{1}{V_0} \frac{dV_{\text{ion}}(t)}{dt} p_2(t) - \frac{1}{V_0} \frac{dV_e J_e(t)}{dt} p_2(t) + \frac{Q}{V_0}, \quad (1)$$

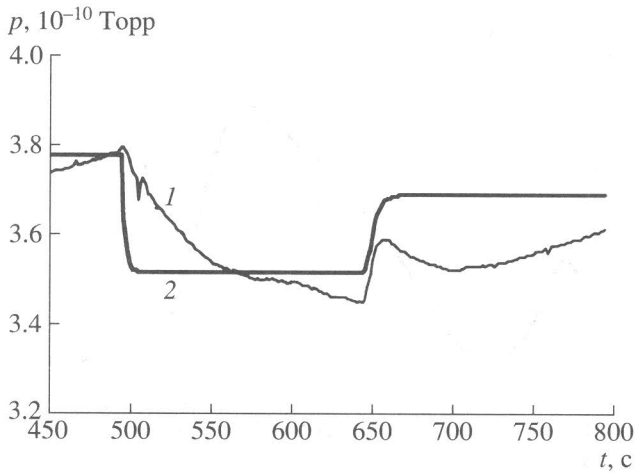


Рис. 3. Зависимость от времени давления  $p$ : 1 – измерение, 2 – моделирование. Ионные насосы включены в момент  $t = 490$  с. Электронный пучок изначально включен до момента  $t = 650$  с.

где  $Q$  – скорость поступления газа;  $\frac{dV_{\text{ion}}(t)}{dt}$  – скорость откачки ионными насосами;  $\frac{1}{J_{e_0}} \frac{dV_e(t)}{dt}$  –

нормированная скорость откачки электронным пучком с током  $J_{e_0}$ ;  $V_0$  – объем вакуумной системы. Интегрирование этого уравнения по времени проводилось с учетом измеренного электронного тока ( $J_e(t)$ , рис. 2) и предположения, что включение ионного насоса и выход его на рабочий режим происходит мгновенно. Параметры откачки и скорость поступления газа подбирались для наилучшего соответствия измеренного и вычисленного давлений. Давление при этом записывалось в виде

$$p(t) = p_1 + p_2(t),$$

где  $p_1$  – постоянное давление для компоненты, определяемой геттерной откачкой;  $p_2(t)$  – давление второй компоненты, определяемой интегрированием уравнения (1).

В результате решения уравнения (1) можно оценить параметры системы. Скорость откачки  $\frac{dV_{\text{ion}}}{dt}$  компоненты, плохо откачиваемой ионными насосами, равна 2 л/с при выключенных ионных насосах (откачка только геттерами) и 80 л/с – при включенных. Газовый поток из-за термодесорб-

ции  $Q = 3.2 \cdot 10^{-9}$  л · Торр/(с · см<sup>2</sup>), что соответствует коэффициенту удельного газоотделения данной компоненты (наиболее вероятно, что это инертные газы или углеводороды) на уровне  $1.5 \cdot 10^{-13}$  л · Торр/с. Скорость откачки электронным пучком составила  $\frac{1}{J_{e_0}} \frac{dV_e}{dt} = 140$  л/(А · с).

Оценим скорость откачки электронным пучком по сечению ионизации остаточного газа. При сечении разрушения молекул  $\sigma = 4 \cdot 10^{-17}$  см<sup>2</sup> электроны с зарядом  $q$ , двигаясь вдоль пучка длиной  $l_e = 5.5$  м, производят эффект откачки, равный

$$\frac{1}{J_{e_0}} \frac{dV_e}{dt} = \frac{1}{q} \sigma l_e = 140 \text{ л/(А · с)}.$$

Энергия электронного пучка составляла 2.3 кэВ, и сечение ионизации, например молекулы СО, близко к использованному для оценок значению.

На рис. 3 видно, что достижение низкого давления после включения откачки ионным насосом происходит заметно медленнее, чем предсказывает моделирование. По-видимому, это связано с медленным включением в работу ячеек ионного насоса при хорошем вакууме. Ступенька же при выключении электронного пучка в момент времени 650 с моделируется неплохо. Дрейф в экспериментальных наблюдениях связан с тем, что эти изменения составляют несколько процентов и медленные процессы в вакуумной системе создают низкочастотное “смещение” общего уровня давления остаточного газа в системе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано, что в системе электронного охлаждения с малыми потерями электронного пучка на стенки вакуумной камеры можно достичь улучшения вакуума при включении электронного пучка. Скорость дополнительной откачки электронным пучком примерно совпадает со скоростью ионизации остаточного газа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tranquille G.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2004. V. 532. P. 399.
2. *Chanel M.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2004. V. 532. P. 137.
3. *Bocharov V., Bublely A., Boimelstein Yu. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A. 2004. V. 532. P. 144.