



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2001–21

ОУ У-70

А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, К.Г. Мирзоев

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ
МАГНИТОРАЗРЯДНЫХ НАСОСОВ ВАКУУМНОЙ
СИСТЕМЫ У-70**

Протвино 2001

Аннотация

Кивер А.М., Лапыгин В.Г., Мирзоев К.Г. Исследование некоторых параметров магнитоэридных насосов вакуумной системы У-70: Препринт ИФВЭ 2001–21. – Протвино, 2001. – 5 с., 4 рис., библиогр.: 4.

Описаны результаты измерений быстроты действия и коэффициента захвата магнитоэридных насосов вакуумной системы У-70. Приведены результаты градуировки давления по току разряда насосов.

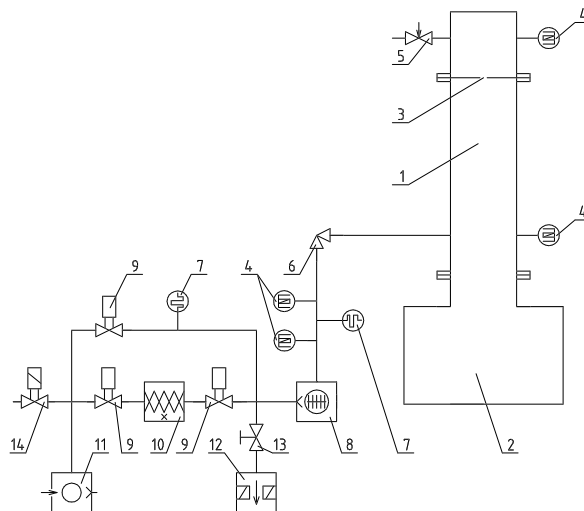
Abstract

Kiver A.M., Lapygin V.G., Mirzoev K.G. The Investigation of Some Parameters of Sputter-Ion Pumps of Vacuum System U-70: IHEP Preprint 2001–21. – Protvino, 2001. – p. 5, figs. 4, refs.: 4.

The results of measurements of pumping speed and the the capture coefficient of sputter-ion pumps of vacuum system U-70 have been described. The results of the pressure graduation by the discharge current of the sputter-ion pumps are presented.

Рабочее давление в вакуумной камере протонного синхротрона ИФВЭ У-70 достигается и поддерживается с помощью высоковакуумных электрофизических титановых насосов. В качестве таковых используются магниторазрядные диодные насосы типа НМД-0,4-1, относительно недавно освоенные и выпускаемые отечественной промышленностью. Эти насосы не получили пока широкого распространения и их параметры недостаточно хорошо изучены. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование характеристик насосов, знание которых поможет более успешной эксплуатации вакуумной системы ускорителя и лучшему определению её параметров. Согласно паспортным данным насос рассчитан на предельное давление ниже $5 \cdot 10^{-10}$ мм рт.ст., а номинальная быстрота действия насоса по воздуху составляет 400 л/с. Для измерения реальных параметров в рабочих условиях проведены измерения быстроты действия насоса по воздуху в зависимости от давления на входе в насос. Измерения проводились методом двух манометров с диафрагмой известной проводимости по общепринятой методике с помощью стандартной измерительной камеры [1]. Внутренний диаметр камеры 160 мм равен диаметру входного фланца насоса. Насос с камерой устанавливался на вакуумный стенд, схема которого показана на рис.1.

Рис. 1. Схема стенда для измерения параметров насоса НМД-0,4. 1 — измерительная камера; 2 — насос НМД-0,4; 3 — калиброванная диафрагма; 4 — манометрический преобразователь ПММ-46; 5 — натекатель; 6 — угловой вентиль Ду-50; 7 — манометрический преобразователь ПМТ-6-3Ф; 8 — турбомолекулярный насос 01АБ-450-003; 9 — пневмоклапан Ду-25; 10 — адсорбционная ловушка; 11 — форвакуумный насос 2НВР-5ДМ; 12 — гелиевый течесислатель ТИ1-14; 13 — вентиль Ду-25; 14 — клапан для напуска воздуха.



Предварительная откачка стенда до давления запуска магниторазрядного насоса осуществлялась пластинчато-роторным форвакуумным насосом 2НВР-5ДМ и турбомолекулярным насосом с вертикальным ротором 01АБ-450-003. Измерение давления производилось электроразрядными магнитными блокировочными вакуумметрами ВМБ1/8-001 с манометрическими преобразователями ПММ-46. Напуск воздуха в измерительную камеру проводился с помощью игольчатого натекаателя с ручным управлением. Запуск НМД и ввод его в рабочий режим осуществлялся с помощью турбомолекулярного насоса. В дальнейшем откачка измерительной камеры проводилась только магниторазрядным насосом в круглосуточном режиме в течение нескольких недель. В результате такой тренировки был достигнут рабочий вакуум $3 \cdot 10^{-10}$ мм рт.ст. при примерно одинаковых показаниях обоих манометров измерительной камеры. Быстрота действия измерялась во всём рабочем диапазоне давлений насоса. После каждого изменения потока воздуха время установления равновесного состояния, при котором давление и ток разряда переставали меняться, составляло не менее 30 минут. Измерения повторялись многократно с целью уменьшения погрешности за счёт большей статистики. Быстрота действия насоса определялась по известной формуле [1]:

$$S = U \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right) \text{ л/с}, \quad (1)$$

где U – пропускная способность диафрагмы измерительной камеры по воздуху, P_2 и P_1 – значения давления над и под диафрагмой соответственно. Давление повышалось до $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст., при котором работа насоса делается неустойчивой. Результаты измерений представлены на рис.2. При давлении ниже 10^{-8} мм рт.ст. быстрота действия резко снижается, а в диапазоне $5 \cdot 10^{-8} \div 10^{-5}$ мм рт.ст. близка к величине 300 л/с. Указанный диапазон давлений имеет практическое значение для У-70, поэтому полученное значение быстроты действия можно считать номинальным для вакуумной системы У-70. Точность измерения давления согласно паспортным данным использованных приборов составляет $-40+80\%$. Однако экспериментальный разброс измерений быстроты действия при близких значениях давления несколько меньше. Так, среднее арифметическое из отклонений от кривой рис.2 находится в пределах $\pm 35\%$. Эта величина может быть принята в качестве погрешности измерений быстроты действия в реальных условиях стенда. На рис.2 приведена также кривая изменения α – коэффициента захвата насоса. Этот параметр является более общей, чем быстрота действия, интегральной характеристикой насоса. Он нередко используется в вакуумной технике и равен отношению быстроты действия насоса к объёму газа V_1 , входящего за 1 с через входное сечение насоса. Используя значения $V_1 = 1/4\bar{V}\pi R^2$ и $U = 1/4\bar{V}\pi R_0^2$, где \bar{V} – среднеарифметическая скорость молекул газа, R и R_0 – радиусы входного фланца насоса и калиброванной диафрагмы соответственно, получим выражение для α в следующем виде:

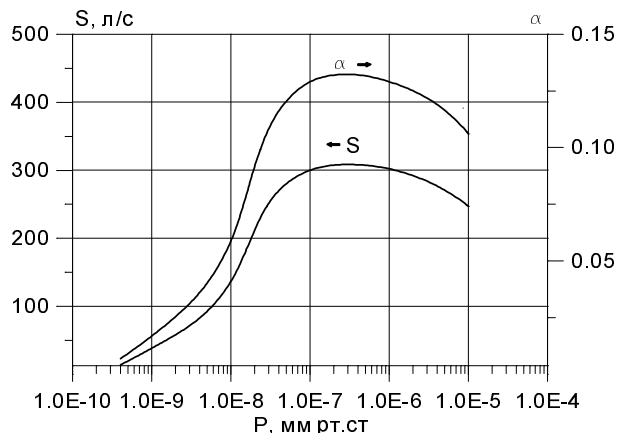


Рис. 2. Зависимость от давления быстроты действия S и коэффициента захвата α насоса НМД-0,4.

$$\alpha = \frac{S}{V_1} = \left(\frac{R_0}{R}\right)^2 \left(\frac{P_2}{P_1} - 1\right). \quad (2)$$

Значение коэффициента захвата в широком диапазоне давлений не превосходит 0,13, что согласуется с данными для магниторазрядных насосов диодного типа [2].

В процессе проведения измерений фиксировалась величина разрядного тока насоса при каждом значении давления P_1 . Это делалось с целью изучения возможности использования насосов НМД-0,4 в качестве измерителей давления в вакуумной камере ускорителя У-70. Одним из уникальных свойств магниторазрядных насосов является близкая к пропорциональной зависимость тока разряда от молекулярной концентрации откачиваемого газа или давления на входе в насос. Эта зависимость, экспериментально снятая при измерениях быстроты действия НМД-0,4, приведена на рис.3. Как видно из рисунка, зависимость близка к линейной. Во всех диапазонах измеренных токов и давлений экспериментальные точки достаточно хорошо аппроксимируются линией, построенной согласно следующей функции:

$$\log[P_{\text{мм рт.ст.}}] = \log[7,2 \cdot 10^{-5}] + 0,87 \log[I_A], \quad (3)$$

где ток разряда измеряется в амперах. Аналогичная зависимость с другими числовыми коэффициентами приводится в некоторых работах [3] для зарубежных образцов магниторазрядных насосов. Прокалиброванный таким образом ток разряда НМД-0,4 может быть использован для определения вакуума у входного фланца в насос. Интересно проверить, насколько данная калибровка соответствует представлениям о механизме откачки газов магниторазрядными насосами. С этой целью в табл.1 приведены данные о токе разряда, соответствующем откачке потока воздуха, равного 1 л·мм рт.ст./с. Это количество выбрано не в качестве реального потока, откачиваемого насосом, а как пример для простоты расчёта. Атмосферный воздух рассматривается как смесь газов. Согласно классическим данным о механизме откачки различных газов магниторазрядной ячейкой насоса [2,4], на каждый электрон, проходящий во внешней цепи, поглощается один атом азота, а на один поглощённый атом кислорода приходится два электрона во внешней цепи. В то же время на каждый откачиваемый атом аргона во внешней цепи должно протекать около 100 электронов.

Таблица 1. Соотношение между потоком откачиваемых атомов и потоком электронов

Газ	N ₂	O ₂	Ar	Воздух
Содержание, %	78	21	1	100
Поток л·мм рт.ст./с	0,78	0,21	0,01	1,0
Поток частиц/с при 293 К	$2,57 \cdot 10^{19}$	$6,93 \cdot 10^{18}$	$3,3 \cdot 10^{17}$	$3,3 \cdot 10^{19}$
Поток атомов/с при 293 К	$5,14 \cdot 10^{19}$	$1,39 \cdot 10^{19}$	$3,3 \cdot 10^{17}$	$6,56 \cdot 10^{19}$
Число электронов на 1 откачиваемый атом	1 e ⁻ /атом	2 e ⁻ /атом	100 e ⁻ /атом	
Общее число электронов/с	$5,14 \cdot 10^{19}$	$2,78 \cdot 10^{19}$	$3,3 \cdot 10^{19}$	$1,12 \cdot 10^{20}$
Число атомов/электрон	1 ат/e ⁻	0,5 ат/e ⁻	0,01 ат/e ⁻	0,58 ат/e ⁻

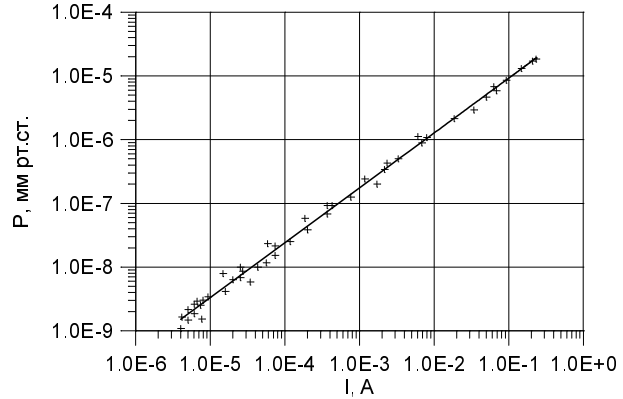


Рис. 3. Зависимость между током разряда насоса и давлением у входа в насос.

Как видно из рисунка, зависимость близка к линейной. Во всех диапазонах измеренных токов и давлений экспериментальные точки достаточно хорошо аппроксимируются линией, построенной согласно следующей функции:

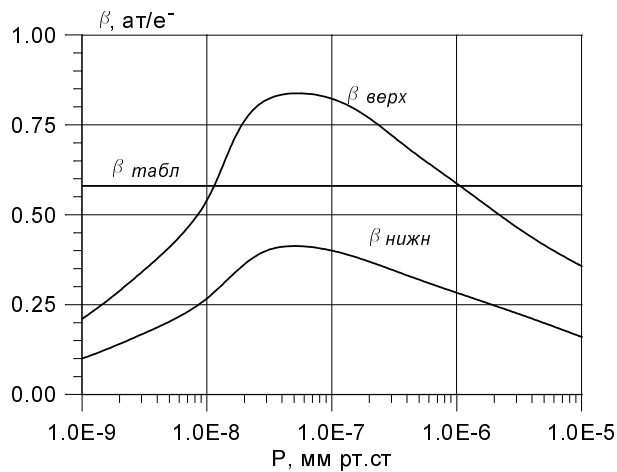


Рис. 4. Зависимость от давления в насосе количества откачиваемых атомов β , приходящихся на один электрон тока разряда насоса.

$P \cdot S$ мм рт.ст., а также вычислить поток откачиваемых атомов воздуха и соответствующую величину отношения β ат/ e^- . Эти данные, экспериментально полученные для насоса НМД-0,4, приведены на рис.4 в виде зависимости β от давления в насосе. В соответствии с пределами экспериментальной погрешности для давления показаны кривые для верхнего и нижнего пределов значений β . Прямая линия соответствует указанному выше для воздуха табличному значению $\beta_{табл}$. Как видно из рисунка, для практически значимых диапазонов давления $10^{-8} \div 10^{-6}$ мм рт.ст. измеренные значения β хорошо согласуются с литературными данными о механизме откачки магниторазрядными насосами компонентов воздуха. Кроме того, относительно небольшое изменение β в этом диапазоне соответствует в первом приближении пропорциональности быстроты действия магниторазрядных насосов интенсивности разряда I/P [2] или, что то же самое, откачиваемого потока — току разряда $S \cdot P \sim I$. Всё это подтверждает правильность полученных результатов и возможность использования соотношения (3) для измерения давления в насосе.

В заключение можно отметить, что проведённую калибровку тока насоса по давлению воздуха можно использовать для оценки давления по водороду. Эти данные могут быть полезны для тех участков вакуумной камеры, где давление определяется, в основном, потоком газовой выделенной стенок, состоящим преимущественно из водорода. При этом надо иметь в виду следующее. Согласно упомянутым выше литературным источникам, в случае откачки водорода магниторазрядными насосами на каждый прошедший во внешней цепи электрон сорбируется несколько атомов водорода. Если понимать под словом “несколько” число порядка $3 \div 5$, то естественно предположить, по крайней мере с 25%-ной точностью, что для водорода $\beta \sim 4$, тогда как для азота $\beta = 1$. Тогда при одном и том же токе насоса поток откачиваемого водорода Q должен быть в 4 раза больше, чем азота. Известно, что быстрота действия диодных насосов по водороду в широком диапазоне давлений примерно в 2 раза превосходит быстроту действия по азоту [2]. Поэтому можно принять, что при одинаковых значениях тока разряда давление водорода $P = Q/S$ должно быть в 2 раза выше, чем для азота или воздуха, и эмпирическая формула для водорода равна:

Следует отметить, что данные цифры учитывают как ионный механизм откачки, так и сорбцию напылёнными плёнками, а также замуровывание ионов инертного газа титановой плёнкой. Таким образом, при откачке указанного выше значения потока воздуха ток разряда должен был бы составлять величину около $10^{20} e^-/с$, т.е. для воздуха характерное соотношение между количествами откачиваемых атомов и электронов при температуре 293 К близко к 0,58 атомов/электрон. Обозначим эту величину как $\beta_{табл}$. Пользуясь графиками рисунков 2 и 3, можно для различных значений давления и тока разряда насоса определить откачиваемый насосом поток воздуха как произведение

$$\log \left[\frac{P_{\text{мм рт.ст}}}{1,45 \cdot 10^{-4}} \right] = 0,87 \log I_A. \quad (4)$$

Ввиду того, что воздух почти на 80% состоит из азота, можно принять, что быстрая откачка по водороду в 2 раза превосходит величину, полученную при стендовых измерениях, и составляет ~ 600 л/с.

Таким образом, результаты проведённой работы показывают, что насосы НМД-0,4 имеют достаточно удовлетворительные рабочие параметры, и подтверждают правильность выбора этих насосов не только в качестве основных средств высоковакуумной откачки, но и в качестве средств измерения давления.

Авторы выражают благодарность Е.Ф. Троянову за поддержку и интерес к работе.

Список литературы

- [1] Ficher E. and Mommson H. // *Vacuum*, 17, 1967, 6, p.309.
- [2] Саксаганский Г.Л. *Электрофизические вакуумные насосы*. — М., Энергоатомиздат, 1988.
- [3] Giacuzzo F. and Miertusova J. In *Proceed. of PAC'95*, v.3, Dallas, Texas, May, 1995, p.2042–2044.
- [4] *Современная вакуумная техника*. / Под ред. Н.В. Черепнина. — М., ИЛ, 1963, с.61–64.

Рукопись поступила 18 апреля 2001 г.

А.М.Кивер, В.Г.Лапыгин, К.Г.Мирзоев

Исследование некоторых параметров магниторазрядных насосов вакуумной системы У-70.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L^AT_EX.

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 03.05.2001. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.

Печ.л. 0,62. Уч.-изд.л. 0,5. Тираж 130. Заказ 78. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

