



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011-1
ОУ У-70

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ
ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА У-70**

Протвино 2011

Аннотация

Кивер А.М., Лапыгин В.Г., Ларионов А.В., Мирзоев К.Г. Исследование вакуумной камеры протонного синхротрона У-70: Препринт ИФВЭ 2011-1. – Протвино, 2011. – 20 с., 6 рис., 2 табл., библиогр.: 8.

Разработаны методика исследования герметичности вакуумной камеры протонного синхротрона У-70 по компонентам натекающего через течи воздуха, а также другие методы измерения герметичности. Приведены данные о местонахождении возможных течей в камере ускорителя. Показано распределение давления по длине кольцевой камеры и среднее давление воздуха и аргона в камере.

Abstract

Kiver A.M., Lapygin V.G., Larionov A.V., Mirzoev K.G. The Investigation of the Vacuum Chamber of the U-70: IHEP Preprint 2011-1. – Protvino, 2011. – p. 20, figs. 6, tables 2, refs.: 8.

The investigation of the tightness vacuum chamber of the U-70, using the components of the air leakage and the other methods of tightness measurements, has been developed. The data of possible location of the leakages are presented. The distribution of the pressure along the length of the chamber and the average pressure of the air and the argon are introduced.

Результаты исследования герметичности вакуумной камеры У-70 позволяют сделать определенные выводы о составе остаточного газа в камере при наличии в ней течей, которые трудно обнаружить с помощью гелиевого течеискателя. Основными источниками газовой нагрузки в камере являются газовыделение стенок и натекание извне через упомянутые течи [1]. Величины потока газовыделения и давления водорода оценивались в работе [2], а измерение давлений основных компонентов остаточного газа – водорода и воздуха – по току разряда откачивающих камеру насосов описано в [3]. Целью настоящей работы является разработка методов определения места течи в камере исходя из оценки величин парциальных давлений компонентов воздуха, натекающих в камеру через эту течь. Особый интерес представляет оценка величины давления аргона, ввиду того, что он вызывает увеличение поперечного размера протонного пучка при рассеянии на остаточном газе камеры. Состав натекающего атмосферного воздуха определяется тремя основными компонентами [4]. Это азот N_2 – 78%, кислород O_2 – 21% и аргон Ar – 0.93%. Содержание других газов (CO_2 , He и др.) пренебрежимо мало. Хотя аргона в воздухе мало, но его следует учитывать ввиду относительно малой скорости действия магниторазрядных насосов по этому газу, а также указанного выше рассеяния протонов. Исходя из процентного содержания, парциальные давления на входе в течь при давлении воздуха в одну атмосферу составляют 594, 159 и 7 мм рт. ст. для азота, кислорода и аргона соответственно. Внутри вакуумной камеры соотношения между парциальными давлениями натекающих газов должны быть другими ввиду разной пропускной способности камеры и канала течи для компонентов воздуха, а также

разной быстроты действия насосов по этим газам. Обозначим через α и β коэффициенты, показывающие, какую часть потока воздуха из течи Q и давления воздуха в камере у патрубков насоса P составляют поток и парциальное давление данного компонента соответственно

$$Q = Q_{N_2} + Q_{O_2} + Q_{Ar} = \alpha_{N_2}Q + \alpha_{O_2}Q + \alpha_{Ar}Q, \quad (1)$$

$$P = P_{N_2} + P_{O_2} + P_{Ar} = \beta_{N_2}P + \beta_{O_2}P + \beta_{Ar}P. \quad (2)$$

Для определения коэффициентов α и β использовались соотношения, полученные авторами ранее в работе [1] для потока воздуха Q_i , натекающего в i -камеру через течь в точке a_i :

$$Q_i(x_i + x_{i+1} - 2a_i) = 2u_0(P_i - P_{i+1}), \quad (3)$$

$$P_i S_i + P_{i+1} S_{i+1} = Q_i + C_i, \quad (4)$$

где i -камерой считается участок между центрами патрубков i - и $i+1$ -насосов; x_i и x_{i+1} – координаты начала камер, отсчет расстояний ведется от $x_{i-1} = 0$; u_0 – удельная проводимость камеры, а P_i, P_{i+1} – давление в камерах у патрубков соседних насосов по воздуху или рассматриваемому газу соответственно при эффективной скорости действия S_i, S_{i+1} ; C_i – сумма потоков в i -камеру с левой и правой стороны. Если с обеих сторон от нее находятся камеры с течью, то, как следует из результатов работы [1], C_i равно

$$C_i = \frac{Q_{i-1} + Q_{i+1}}{2}. \quad (5)$$

Если в соседних камерах течей нет, то поток с каждой стороны равен разности между давлением в патрубке i -камеры с этой стороны и давлением в соответствующем соседнем патрубке, умноженной на проводимость этой соседней камеры. Вычисление коэффициентов проводилось по двум участкам из трех последовательных камер каждый, для которых были определены ранее значения потоков течей и места их

расположения с помощью метода поочередного отключения соседних насосов [1]. Номера этих камер 68.1; 70; 70.1 и 90.1; 91; 92 соответственно. Таким образом, набиралась статистика на шести камерах. Критерием при определении коэффициентов являлась степень соответствия парциальных давлений и потоков соотношениям (3) – (5). Вероятные диапазоны значений коэффициентов α оценивались в зависимости от режима течения газа в канале течи. Обычно рассматриваются два режима течения – молекулярный и вязкостный – при которых движение газа зависит соответственно от столкновения молекул между собой либо со стенками канала. В молекулярном режиме поток газа из канала пропорционален разности давлений на его концах, а в вязкостном – разности квадратов этих давлений [5]. Используя эти данные, можно найти отношения потоков компонентов воздуха, а затем и соответствующие коэффициенты α . Их значения разные для обоих режимов. Так, при переходе от вязкостного к молекулярному режиму течения, величина α_{N_2} меняется с 0,942 на 0,794, α_{O_2} с 0,06 на 0,2, а α_{Ar} с $1 \cdot 10^{-4}$ на $8 \cdot 10^{-3}$. В настоящей работе подбирались наиболее приемлемые значения коэффициентов α_{N_2} и α_{O_2} , затем α_{Ar} определялось из (1), а β_{N_2}, β_{O_2} и β_{Ar} из (3) и (4). В результате вычислений выяснилось, что и вязкостный и молекулярный режимы в отдельности плохо удовлетворяют соотношениям (3) – (5). Наилучшее согласие имеет место, если допустить, что в каналах течей осуществляется некоторый условный режим, при котором коэффициенты имеют следующие значения:

$$\alpha_{N_2} = 0.92 \div 0.93; \quad \alpha_{O_2} = 0.072; \quad \alpha_{Ar} = 1.6 \cdot 10^{-3}; \quad (6)$$

$$\beta_{N_2} = 0.88; \quad \beta_{O_2} = 0.09; \quad \beta_{Ar} = 0.02 - 0.03. \quad (7)$$

Как видно, α для азота почти совпадает со значением для вязкостного режима, для кислорода – превосходит его на 20%, а в случае аргона α значительно отличается от обоих режимов. Хотя в литературе имеются упоминания о том, что реальный режим в канале течи может представлять собой линейную комбинацию обоих режимов [5], но по результатам настоящей работы не представляется возможным сделать какие-либо выводы относительно режима течения в канале и приведенные в (6) и (7) величины носят эмпирический характер. Тем не менее, очевидно, они могут быть использованы

для оценки парциальных давлений и потоков компонентов воздуха. Значения α и β для азота хорошо согласуются с (3) и (4), для кислорода согласие не очень хорошее и в (7) приведена средняя величина $\pm 12\%$. В случае аргона (3) и (4) выполняются с точностью до 20–25%. Возможно, это связано с выделением небольшого количества аргона из насосов при пробоях в электродных блоках. Величины (7) выражают спектр остаточного газа при наличии в камере течи. При проверке применимости (4) для компонентов воздуха должно выполняться условие равенства сумм потоков компонентов соответствующим потокам воздуха. Так как произведение давления на быстроту действия является потоком, то это условие выражается в виде следующих соотношений:

$$P_{iN_2} S_{iN_2} + P_{iO_2} S_{iO_2} + P_{iAr} S_{iAr} = P_i S_i, \quad P_{i+1,N_2} S_{i+1,N_2} + P_{i+1,O_2} S_{i+1,O_2} + P_{i+1,Ar} S_{i+1,Ar} = P_{i+1} S_{i+1}. \quad (8)$$

То же относится и к правой части (4). При проведении всех оценок необходимо знать величины эффективной быстроты действия S по компонентам воздуха $S = S_H U (S_H + U)^{-1}$ [4], где U – пропускная способность трубопровода от насоса до камеры по данному газу, а S_H – быстрота действия насоса, которая известна только как приближительная величина. В частности, она зависит от давления и времени работы насоса, может меняться от одного насоса к другому, от степени загрязнения и температуры насоса и ряда других причин. Поэтому в настоящей работе взяты средние значения быстроты действия из литературных данных [6], согласно которым быстрота действия магниторазрядных насосов по кислороду составляет $0,55 \div 0,6$ быстроты действия по азоту (при одном и том же давлении воздуха), для аргона она находится в пределах $0,01 \div 0,06 S_{HN_2}$, а последняя при значениях коэффициентов (6) и (7) может составлять примерно 1.1 от измеренной в [7]. С учетом состава воздуха и точности измерений в диапазоне давлений $10^{-7} \div 10^{-6}$ мм рт. ст., где S_H почти не зависит от давления, величина $S_{N_2} = 170$ л/с. Для проверки величин быстроты действия использовалось соотношение (8). Наилучшее согласие всех данных с (3) \div (8) достигается при следующих значениях быстроты действия насосов:

$$S_{HN_2} = 340 \text{ л/с}; \quad S_{HO_2} = 195 \text{ л/с} = 0.57 S_{HN_2}; \quad S_{HAr} = 9.1 \text{ л/с} = 0.026 S_{HN_2}. \quad (9)$$

Как видно, полученное значение быстроты действия насоса по кислороду близко к среднему, а для аргона находится в пределах значений, приведенных в литературе. По результатам вычислений и графика для S_H из [7] построены зависимости быстроты действия насоса по компонентам от давления воздуха в насосе, представленные на рис. 1.

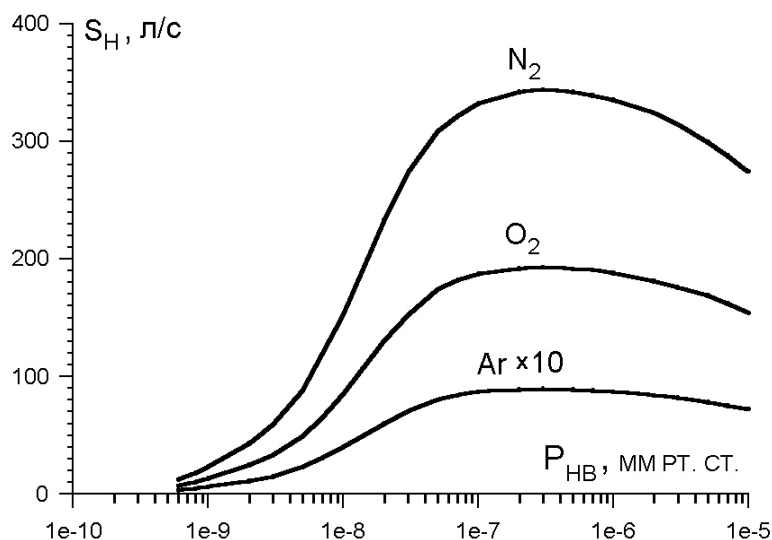


Рис. 1. Быстрота действия насоса НМД-0.4 по компонентам воздуха в зависимости от давления в насосе.

Также определены зависимости эффективной быстроты действия для компонентов от давления воздуха в патрубке, приведенные на рис. 2, по которым удобно проводить вычисления.

Результаты вычислений показывают, что при значениях коэффициентов (6) и (7) и данных из рис. 2 средние отклонения сумм (8) от потоков воздуха составляют $\pm 10\%$, а для сумм потоков со стороны соседних камер в правой стороне (4) и в (5) отклонения от C_i достигают $\pm 25-30\%$. Это можно объяснить тем, что источником потоков из соседних камер могут быть не только течи. Так, в случае азота (массовое число 28) поток может быть от локальных загрязнений поверхности камеры окисью углерода CO , кислород может выделяться при разложении паров углеводородов в разряде, а источником аргона могут стать насосы при высоковольтных пробоях и аргоновой нестабильности. Однако в целом указанная точность вполне удовлетворительна. Ранее указывалось [2],

что около 10% остаточного газа камеры составляет водород, а до 3% могут составлять легкие углеводороды. Поэтому можно принять, что давление азота составляет 76%, кислорода 8%, а аргона 2.5–3% от общего давления в камере ускорителя. Таким может быть спектр остаточного газа в камере во второй половине сеанса работы, когда пары воды из-за хорошей откачки магниторазрядными насосами можно не учитывать.

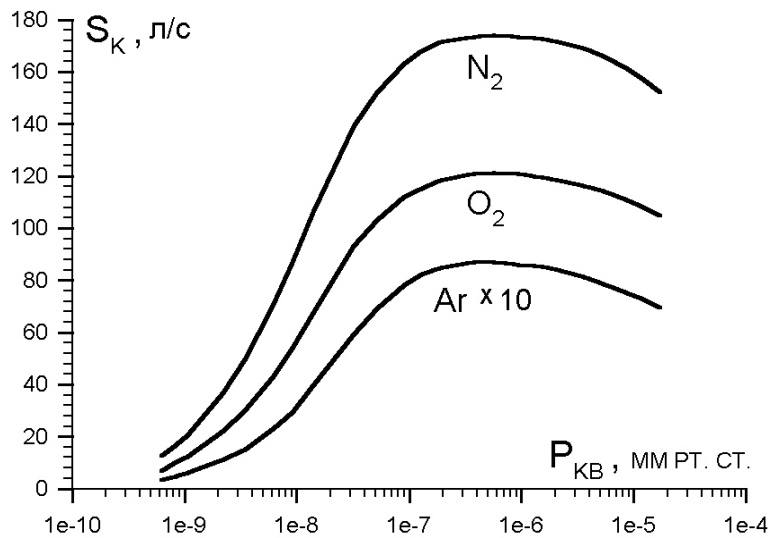


Рис. 2. Эффективная быстродействие в камере у патрубка насоса в зависимости от давления воздуха в патрубке.

При откачке натекающего через течь потока разрядный ток насоса распределяется между компонентами воздуха следующим образом. Доля каждого из них должна соответствовать указанным в (6) коэффициентам α . Однако необходимо учесть, что молекулы азота и кислорода двухатомные, аргон – одноатомный, а при откачке одного атома во внешней цепи источника питания насоса должны протекать один, два и сто электронов для азота, кислорода и аргона соответственно [7]. Тогда разрядный ток насоса при откачке воздуха можно представить в виде суммы трех частей, равных числу электронов, приходящихся на каждый из компонентов:

$$I = I_{N_2} + I_{O_2} + I_{Ar} = \alpha_{N_2} \cdot K \cdot 2 \cdot 1 + \alpha_{O_2} \cdot K \cdot 2 \cdot 2 + \alpha_{Ar} \cdot K \cdot 1 \cdot 100,$$

где K – поток откачиваемых молекул воздуха. Подставляя значения α из (6), получим справа $2.31 \cdot K$. Тогда доля каждого газа в токе разряда, обеспечивающем откачку воздуха, равна:

$$I_{N_2} = 0.805I; \quad I_{O_2} = 0.125I; \quad I_{Ar} = 0.07I. \quad (10)$$

Используя данные (7), (10) и [7], можно построить графики зависимости давления компонентов воздуха от разрядного тока насоса. На рис. 3 представлены давления компонентов в насосе в зависимости от тока данного компонента, а на рис. 4 – давления компонентов в патрубках камер в зависимости от тока насоса по воздуху.

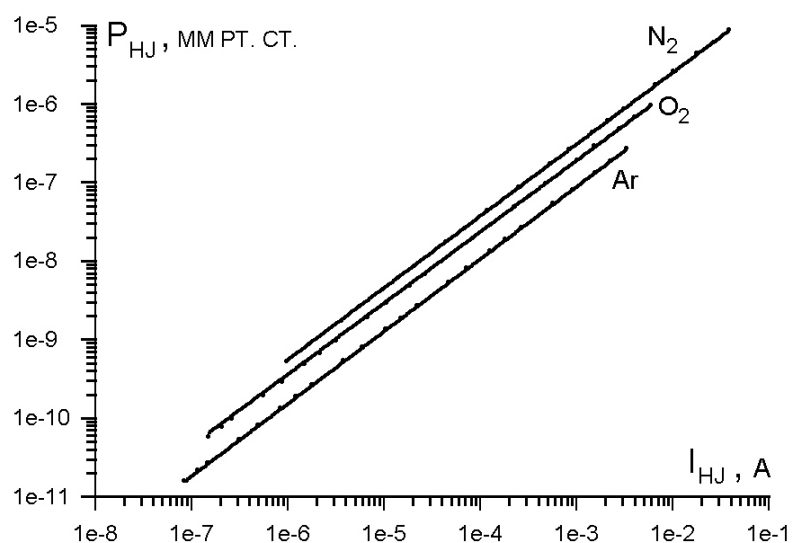


Рис. 3. Зависимость давлений компонентов воздуха от тока разряда, приходящегося на данный компонент.

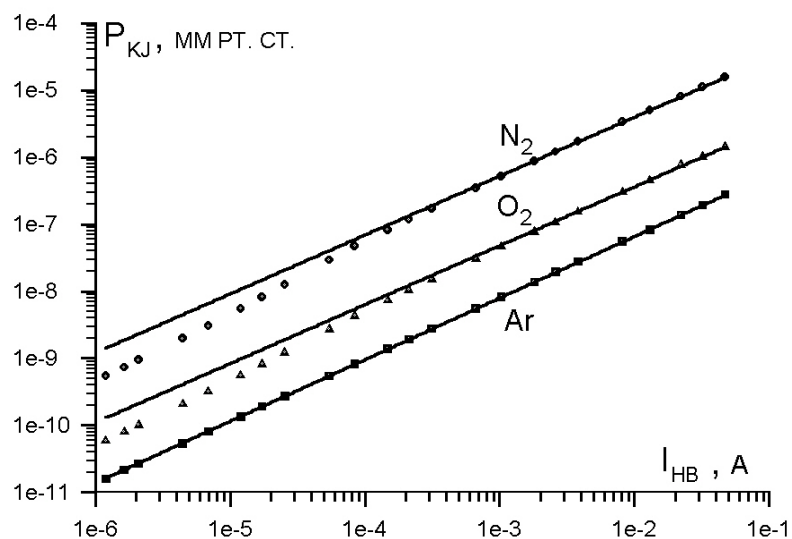


Рис. 4. Зависимость давления компонентов в патрубках камер от тока разряда насоса по воздуху.

Графики на этих рисунках хорошо аппроксимируются следующими аналитическими выражениями, которые удобно использовать при определении величин давления:

$$P_{Hj} = yI_{Hj}^z, \quad P_{Kj} = y_1I_{Hj}^{z_1}, \quad (11)$$

где индекс j обозначает: воздух, N_2, O_2, Ar , а значения величин y, y_1, z, z_1 приведены в табл. 1. В (11) давление выражается в мм рт. ст., а ток – в амперах.

Таблица 1.

	y	z	y_1	z_1
1. Воздух	$1.672 \cdot 10^{-4}$	0.9214	$2.557 \cdot 10^{-4}$	0.8821
2. Азот	$1.726 \cdot 10^{-4}$	0.9139	$2.3 \cdot 10^{-4}$	0.8789
3. Кислород	$1.025 \cdot 10^{-4}$	0.9074	$2.115 \cdot 10^{-5}$	0.8793
4. Аргон	$5.23 \cdot 10^{-5}$	0.9214	$4.6 \cdot 10^{-6}$	0.9191

Полученные результаты позволяют разработать относительно простой метод нахождения места течи в камере в дополнение к описанным в [1]. Он не требует отключения соседнего насоса и может быть применен к любой камере с течью независимо от состояния соседних камер. Согласно полученным в [1] решениям, значение давления P_{ai} в точке течи a_i i -камеры можно определить из следующих соотношений:

$$P_{ai} - P_i = \frac{Q_i(a_i - x_i)}{2u_0}, \quad (12)$$

$$P_{ai} - P_{i+1} = \frac{Q_i(x_{i+1} - a_i)}{2u_0}. \quad (13)$$

Если взять значение давления в месте течи одного компонента из (12), а другого из (13), обозначить их отношение через b и определить его величину из измеренных параметров указанных выше шести камер, то можно заметить, что значения параметров b достаточно хорошо аппроксимируются следующими выражениями:

$$\frac{P_{aiN_2}}{P_{aiO_2}} = b_{N_2O_2} = 0,5 \frac{\alpha_{N_2}}{\alpha_{O_2}} + 0,5 \frac{\beta_{N_2}}{\beta_{O_2}}; \quad \frac{P_{aiN_2}}{P_{aiAr}} = b_{N_2Ar} = 0,1 \frac{\alpha_{N_2}}{\alpha_{Ar}} + 0,9 \frac{\beta_{N_2}}{\beta_{Ar}};$$

$$\frac{P_{aiO_2}}{P_{aiAr}} = b_{O_2Ar} = 0,1 \frac{\alpha_{O_2}}{\alpha_{Ar}} + 0,9 \frac{\beta_{O_2}}{\beta_{Ar}}. \quad (14)$$

Поэтому можно приравнять отношения давлений в месте течи для двух компонентов к соответствующей величине b , из полученного выражения и (3) для воздуха исключить неизвестный поток Q_i и после преобразований получить соотношение для определения a_i :

$$a_i = \frac{u_0(P_{i+1} - P_i)(\alpha_{N_2}x_i + \frac{u_{0N_2}}{u_{0O_2}} b_{N_2O_2} \alpha_{O_2}x_{i+1}) - u_{0N_2}(x_i + x_{i+1})(b_{N_2O_2}P_{i+1,O_2} - P_{iN_2})}{u_0(P_{i+1} - P_i)(\alpha_{N_2} + \frac{u_{0N_2}}{u_{0O_2}} b_{N_2O_2} \alpha_{O_2}) - 2u_{0N_2}(b_{N_2O_2}P_{i+1,O_2} - P_{iN_2})}. \quad (15)$$

Здесь взято отношение давлений азота и кислорода. Для набора статистики можно взять отношения давлений также и других компонентов, так как место течи у них одно и то же. Средняя величина может точнее определить место течи. При вычислении по (15) мест течи в шести указанных выше камерах отличие от ранее вычисленных значений a_i [1] составило $\pm 5-7\%$, что подтверждает пригодность описанного способа определения парциальных давлений компонентов воздуха. Давление воздуха измерялось вычитанием из полного тока разряда насоса величины тока, соответствующей откачиваемому потоку водорода [2].

Кроме описанного выше и в [1] методов определения мест течи был разработан еще один метод, также не требующий поочередного отключения магниторазрядных насосов. С этой целью соотношения (12) и (13) для азота и кислорода рассматривались как система из четырех линейных алгебраических уравнений. С учетом (6) и (7) эта система содержит 4 неизвестных параметра: $a_i, Q_i, P_{aiN_2}, P_{aiO_2}$ и может быть так же, как в [1], численно решена с помощью компьютерной математической системы Mathcad [8]. При этом не требуется получать значение величины a_i в аналитическом

виде. Параметры аргона не использовались ввиду худшей, по сравнению с азотом и кислородом, точности экспериментальных данных по аргону. Проверка полученного приближенного значения корня a_i проводилась по (3) для воздуха. Результаты оценки величин a_i разными методами сведены в табл. 2 для всех камер кольца У-70. Здесь в столбцах 3 и 4 показаны результаты по первым двум методам в сеансах 2005-го года, а в столбцах 5 и 6 – результаты решения системы уравнений по измерениям давлений в камере в сеансах 2006-го года. Как видно, большинство измерений дают не слишком большие отклонения от средних величин \bar{a}_i для каждой камеры, а среднее отклонение для всех 122 камер составляет $\pm 10\text{--}11\%$. В сочетании с большой статистикой по сеансам работы ускорителя и разным методам вычислений это позволяет надеяться, что результаты данного исследования могут представлять практический интерес для вакуумной камеры У-70. В табл. 2 не включены камеры, которые являются сосредоточенными объемами, как, например, камеры кикер- и септум-магнитов, ввода и вывода, резонаторы, дефлектор и т.п. Если же эти устройства оказываются на конце камер, указанных в таблице, то такие случаи приведены для справки и указывают на то, где могла бы располагаться течь, если бы данная камера была обычной протяженной по длине камерой. Отсчет значений величин a_i производится от центра патрубка насоса каждой камеры, принятого за начало данной камеры.

Таблица 2.

№ п/п	№ камер и насосов	l_i , см	a_i , см				\bar{a}_i сред.	Δa_i \pm %	x, м	Примечание
			a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	120	741	279	344	285	337	311	9.4	1.5	
2	120.1	1731.3	1036	1055	880	964	984	6.3	8.91	
3	2	1168.7	509	472	504	503	497	2.5	26.2	
4	3	953.8	581	599	427	600	552	11.3	37.91	
5	4	2400.8	1135	1160	1259	947	1125	7.9	47.45	
6	6	1056.6	516	493	454	432	474	6.5	76.8	
7	7	1303.6	597	635	555	633	605	4.8	87.36	
8	8	741	314	282	260	359	304	10.8	100.4	
9	8.1	1731.3	954	1038	873	890	939	6.1	107.81	
10	10	741	183	232	122	148	171	21.2	125.12	

11	10.1	1168.7	538	650	542	801	633	14.6	132.53	
12	11	1731.3	1224	1008	1323	1310	1216	8,6	144.22	
13	13	922.4	498	526	546	548	529	3.3	161.53	
14	14	1550	----	780	---	637	709	10.1	170.76	
15	15	911.6	595	532	631	336	523	14.2	186.25	
16	16	2046	723	534	522	558	584	11.9	206.71	
17	17	388.6	353	234	243	238	267	3.7	218.4	
18	18	915	608	645	904	619	694	15.1	222.28	
19	18.1	427.6	166	194	139	182	170	10.4	231.43	
20	19	741	346	306	260	217	282	15.5	235.71	
21	19.1	1477.9	737	817	538	800	723	12.8	243.12	
22	20	1164.7	754	884	804	758	800	9.93	257.94	
23	21	1307.6	654	705	655	689	676	3.1	269.59	
24	22	1055.3	513	439	334	361	412	15.6	282.66	
25	23	614.3	326	315	436	323	350	12.3	293.21	
26	24	822.8	434	515	516	516	490	6.8	299.36	
27	25	1200	552	542	515	448	514	6.5	307.6	
28	26	1280	675	665	686	677	676	0.9	320.39	
29	29.1	1270.9	627	629	576	600	608	3.3	344.41	
30	29	1244.3	622	566	608	561	589	4.4	357.12	
31	30	1241.8	483	501	381	287	413	19.1	369.56	
32	31	1186.2	691	----	968	833	831	16.8	382.0	
33	32	2129.1	1134	1339	1551	1503	1382	10.5	393.84	
34	33	787	322	339	263	291	304	8.9	415.13	
35	34	629.1	313	263	310	239	281	10.7	423.0	
36	34.1	1056.6	359	629	353	356	424	24.1	429.3	
37	35	432.5	232	177	229	104	186	24.2	433.6	
38	36	1411.2	87	109	195	79	117	32.9	439.86	
39	36.1	741	431	387	405	429	413	4.1	454.02	
40	37	564	343	282	403	282	327	13.9	465.7	
41	38	2472.3	1028	1178	1111	886	1051	8.9	478.74	
42	39	1909.6	743	718	517	499	619	17.9	490.43	
43	41	1303.7	890	781	662	674	752	11.2	509.53	
44	42	1056.7	641	604	702	550	624	7.5	522.56	
45	44	1685.7	655	573	550	276	529	23	546.7	
46	45	1416.1	585	722	1000	714	755	16.2	563.5	
47	46	1168.7	374	671	353	627	506	25.2	577.67	
48	47	1303.7	507	621	544	648	580	9.4	589.36	
49	48	1168.7	778	617	717	648	690	8.3	602.4	
50	40	1303.7	517	678	508	746	612	16.3	614.1	
51	41	427.6	214	171	214	136	184	16.4	627.12	
52	42	741	364	256	344	207	293	20.9	631.0	
53	43	1303.7	704	753	778	842	769	5,3	638.1	

54	44	1056.7	479	561	449	571	515	9.9	651.84	
55	53	1416.1	1393	1358	1578	1467	1449	5.1	662.41	
56	54	1056.7	380	421	389	206	349	20.5	676.57	
57	55	1416.1	646	565	624	470	576	12.2	687.14	
58	56	1168.7	583	586	581	701	613	7.2	701.3	
59	57	1731.4	892	986	924	901	926	3.2	713.0	
60	58	741	81	105	9	27	56	68	730.3	
61	59	1303.7	620	829	784	616	712	13.2	737.71	
62	60	1414.7	1386	1214	1411	1344	1339	4.6	750.75	
63	62.2	983.1	----	51	12	15	26	65	765,64	
64	63	1330.2	713	887	730	712	760	8.3	775.5	
65	64.3	902.6	353	349	440	482	406	13.5	786.3	
66	65	1348.4	659	887	627	747	730	11.9	800.2	
67	66.2	2088.6	635	640	----	----	637	0.5	815.73	
68	67	562.6	331	304	308	305	312	3.0	836.62	
69	68	741	530	624	530	560	586	7.5	842.24	
70	68.1	1731.3	1019	1069	865	1009	990	6.4	849.65	
71	70	741	288	238	266	286	270	6.5	866.98	
72	70.1	1168.7	454	295	224	161	283	32	874.4	
73	71	1303.7	553	586	672	526	584	7.7	886.09	
74	72	1056.7	539	624	537	810	627	14.5	899.13	
75	73	1416.1	851	1033	995	956	959	5.7	909.69	
76	74	1843.7	717	----	723	----	720	0.4	923.9	
77	76	629	349	357	410	374	372	5.2	942.3	
78	76.1	1168.7	605	638	771	794	702	11.5	948.6	
79	77	1303.7	619	605	607	598	607	1.0	960.3	
80	78	1168.7	396	373	231	280	320	19.6	974.8	
81	79	1303.7	716	901	786	834	809	7.2	985.0	
82	80	1731.3	1396	1260	1524	1582	1440	7.8	998.0	
83	82	741	332	245	190	222	247	17.0	1015.4	
84	82.1	1056.7	809	971	883	915	894	5.4	1022.8	
85	83	1416.1	718	860	734	804	779	6.8	1033.3	
86	84	427.6	134	138	145	148	141	3.7	1047.5	
87	85	629	472	408	482	507	467	6.4	1051.8	
88	85.1	787.2	388	433	374	525	430	11.4	1058.1	
89	86.1	629	83	184	141	121	132	22.7	1065.0	
90	86	1731.3	838	807	745	828	804	3.7	1072.2	
91	88	741	351	367	357	348	356	1.7	1089.5	
92	88.1	1731.3	732	932	856	656	794	12.6	1096.9	
93	90	741	254	279	237	188	239	11.3	1114.3	
94	90.1	1168.7	454	420	501	448	447	6.9	1121.7	

95	91	1303.7	736	989	657	885	817	14.7	1133.4	
96	92	1843.7	1246	1211	1402	1311	1292	0.5	1146.4	
97	94	629	236	197	190	196	205	7.8	1164.8	
98	94.1	1056.7	418	482	357	421	419	7.6	1171.1	
99	95	1416.1	642	622	687	580	633	5.1	1181.7	
100	96	1731.3	930	829	969	795	881	7.8	1195.9	
101	98	741	319	402	291	402	353	13.7	1213.2	
102	98.1	1731.3	1459	1364	1543	----	1455	4.2	1220.6	
103	100	741	272	254	161	173	215	22.3	1237.9	
104	100.1	1168.7	464	482	531	592	517	8.5	1245.3	
105	101	1303.7	769	759	717	770	754	2,4	1257.0	
106	102	1056.7	617	502	793	518	697	16	1270.0	
107	103	393.5	259	213	249	213	233	8.8	1280.6	
108	104.1	1022.6	504	495	455	484	484	3.1	1284.5	
109	104	1395.7	714	739	780	806	769	4.3	1294.8	
110	107	1191.7	505	511	432	447	474	7.2	1324.9	
111	108	741.1	498	574	576	561	552	4.9	1336.8	
112	108.1	1731.3	759	----	1009	1025	931	12.4	1344.2	
113	110	741	539	510	450	545	511	5.6	1361.6	
114	110.1	1731.3	1004	928	757	846	884	9.3	1369.0	
115	112	741	344	345	333	335	339	1.5	1386.3	
116	112.1	1843.3	1115	1062	1159	1099	1109	2.5	1393.7	
117	114	629	262	264	243	253	255	2.9	1412.1	
118	14.1	1843.7	1041	1156	1149	1081	1107	4.2	1418.4	
119	116	629	176	216	133	187	178	13.2	1436.9	
120	116.1	1168.7	446	488	392	404	432	8.0	1443.1	
121	117	1303.7	879	861	969	979	922	5.6	1454.8	
122	118	1731.3	908	837	902	840	872	3.8	1467.9	
123	120								1485.2	

Графической иллюстрацией результатов, полученных в настоящей работе, являются рис. 5.1 – 5.5, на которых показано распределение давления воздуха по камерам и участкам кольца ускорителя. Объяснения к этим рисункам приведены ниже. Среднее давление в камере можно определить, проинтегрировав от x_i до x_{i+1} решение уравнения для давления из [1] и разделив на длину i -камеры:

$$\bar{P}_i = P_i + \frac{Q_i}{2u_0(x_{i+1} - x_i)} \left[x_{i+1}(2a_i - x_i) + \frac{1}{2}(x_i^2 - x_{i+1}^2 - 2a_i^2) \right]. \quad (16)$$

Ввиду линейного изменения давления воздуха по длине камеры это же среднее давление можно определить как среднее арифметическое между давлением в месте течи и на концах камеры с учетом места расположения течи:

$$\tilde{P}_i = \frac{1}{x_{i+1} - x_i} \left[\frac{P_a + P_i}{2} (a_i - x_i) + \frac{P_a + P_{i+1}}{2} (x_{i+1} - a_i) \right]. \quad (17)$$

Значения средних давлений, вычисленные по (16) и (17), хорошо совпадают между собой.

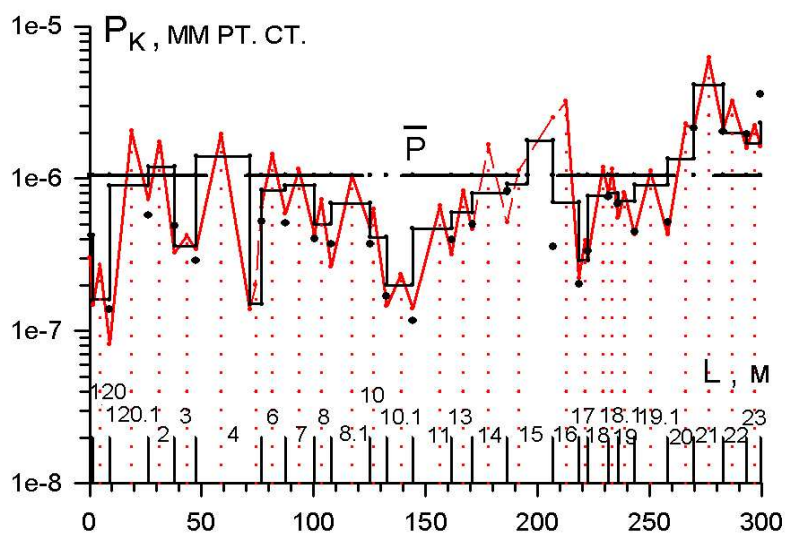


Рис. 5.1.

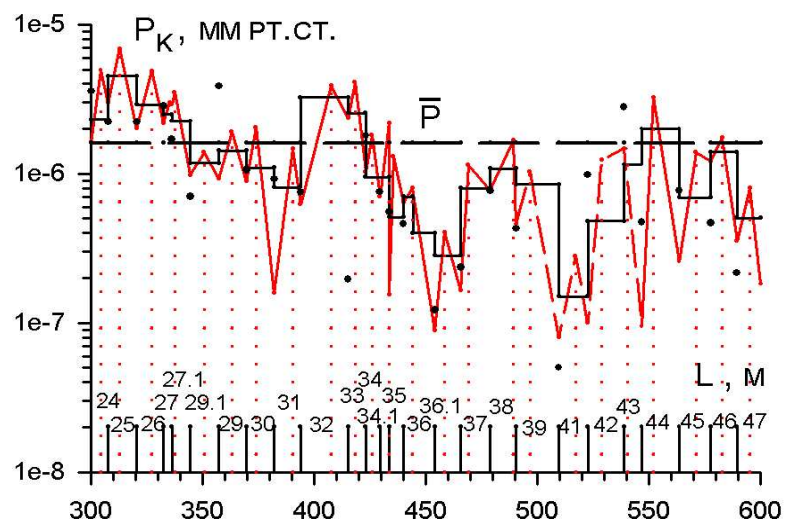


Рис. 5.2.

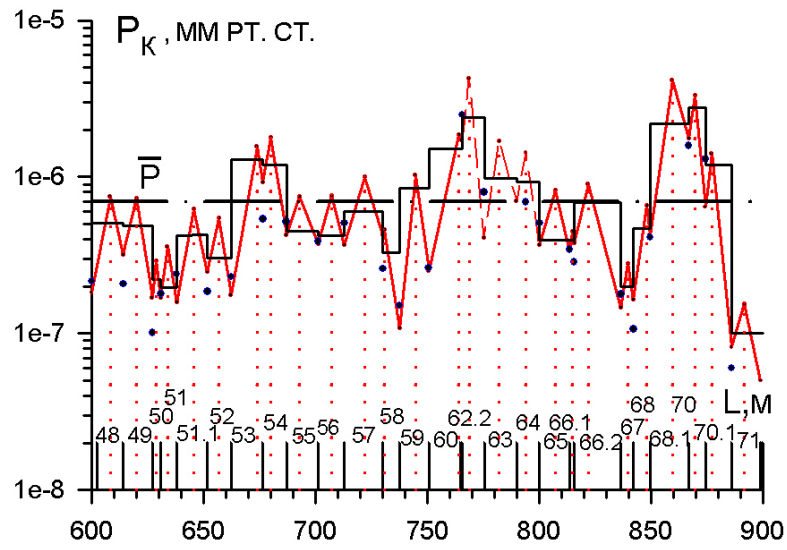


Рис. 5.3.

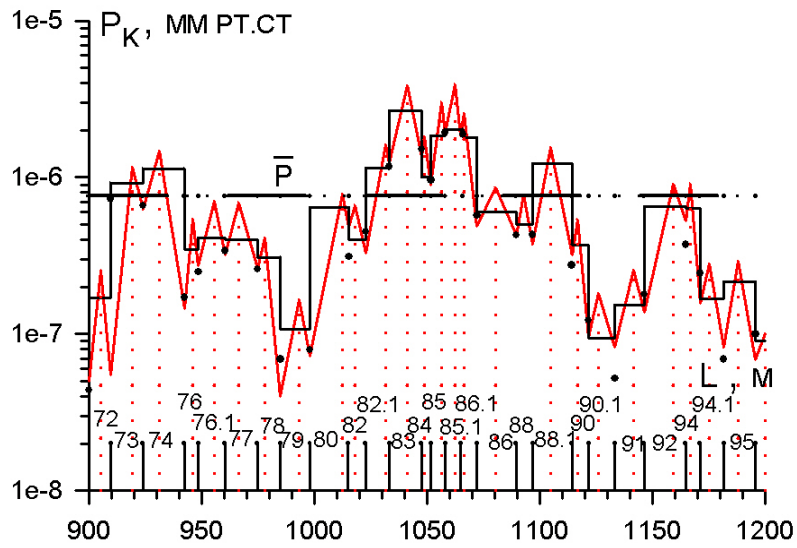


Рис. 5.4.

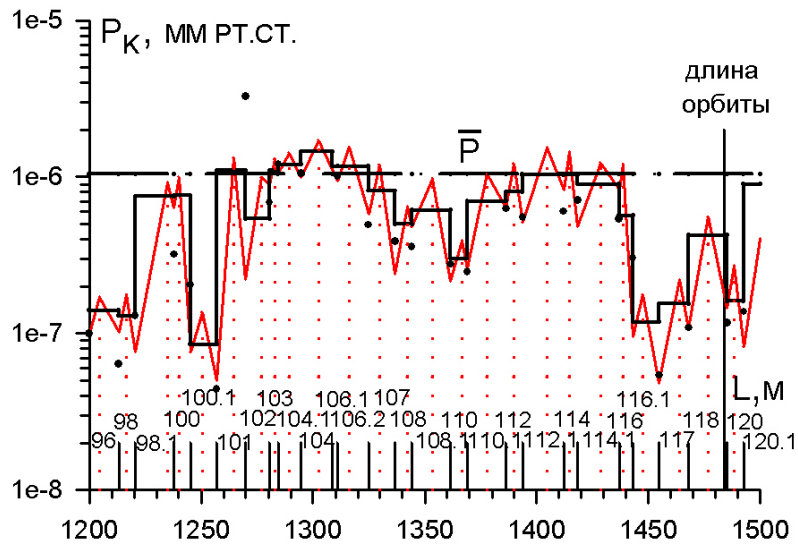


Рис.5.5.

Рис. 5.1 – 5,5. Изменение реального и среднего значений давления воздуха по длине кольцевой камеры ускорителя. В нижней части графиков отмечены границы камер, а цифрами обозначены их номера.

На рис. 5.1 – 5.5 тонкие линии показывают изменение давления воздуха по длине каждой камеры и всего участка, вычисленные по решениям уравнений из [1], точки минимумов в каждой камере – места расположения насосов, а точки максимальных давлений – предполагаемые места течей, соответствующие \bar{a}_i из табл. 2. Пунктирные линии проведены в местах нахождения таких устройств, как кикер- и септум-магниты, мишенные патрубки и т. п., которые не являются камерами периодической структуры и для которых не определялись места течей. Вертикальные пунктирные линии уточняют места нахождения течей в камерах. Жирными точками отмечены вычисленные значения давлений в насосных патрубках камер, определенные следующим образом. Как показано в [1], поток, откачиваемый каждым насосом, равен сумме половин потоков от течей слева и справа от этого насоса:

$$P_i S_i = \frac{1}{2} (Q_{i-1} + Q_i). \quad (18)$$

Потоки течей определялись для каждой камеры независимо от соседних с помощью (15) и (3), а значения P_i определялись по (18). Как видно из рисунков, вычисленные значения давлений достаточно хорошо соответствуют измеренным, что подтверждает применимость предлагаемой методики, так как параметры соседних камер успешно «стыкуются» между собой, а не накапливают ошибки вычислений и измерений даже для значительной последовательности камер. Жирная линия показывает среднее давление во всех камерах по (16) – (17) в сеансе работы в декабре 2006 года, а прерывистая горизонтальная линия – среднее давление на всем участке данного рисунка. Видно, что наибольшие величины среднего давления приходятся на участки камеры в осях 14 – 39, где расположены мишенные патрубки, кикер- и септум-магниты и выходные камеры ряда каналов.

Таким образом, данные графики дают достаточно полную информацию о давлении и среднем давлении воздуха, а также о состоянии герметичности в кольцевой вакуумной камере. Среднее давление по всей кольцевой камере выражается как

$$\bar{P} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i \bar{P}_i, \quad (19)$$

где L – длина, равная сумме длин n камер. В упомянутом выше сеансе величина среднего давления воздуха в кольце составила $1.04 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Ввиду особой роли аргона в рассеянии протонного пучка подсчитывалось среднее давление аргона во всех камерах по формулам (16) и (17) в том же сеансе. Результаты расчета представлены на рис. 6 в виде графика зависимости между средними давлениями аргона и воздуха. Соотношение между ними можно аппроксимировать следующим выражением:

$$\bar{P}_{Ar} = 3,37 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{P}_{возд}^{0.88}. \quad (20)$$

Для удобства использования на рис. 6 эта зависимость продолжена в сторону малых $10^{-8} - 10^{-7}$ и более высоких давлений $10^{-5} - 10^{-4}$ мм рт. ст. Отношение средних давлений воздуха и аргона, усредненное по всем камерам, равно $\bar{P}_{возд} / \bar{P}_{Ar} = 57,4 \pm 25\%$, что согласуется с аппроксимацией (20). Исходя из этого, можно принять, что среднее давление аргона составляет, в среднем, два процента от среднего давления воздуха в камере ускорителя.

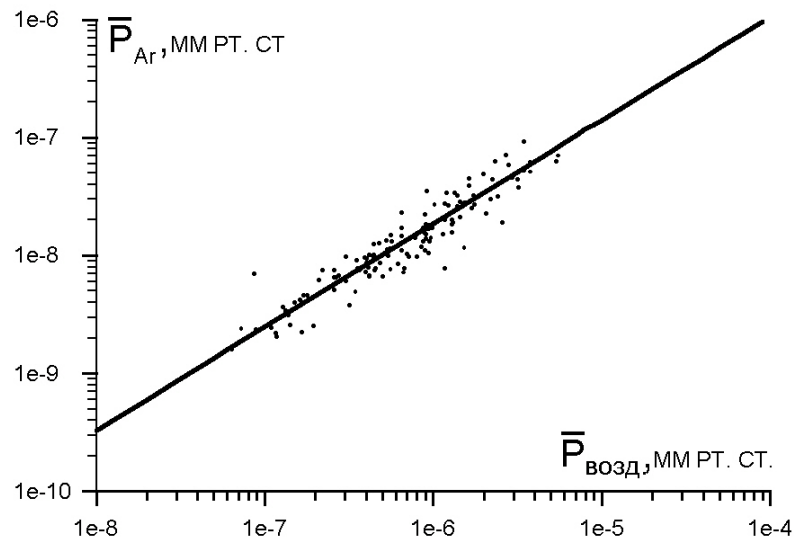


Рис. 6. Зависимость между средним давлением аргона и воздуха.

Таким образом, в настоящей работе получены следующие основные результаты:

1. Разработана методика, позволяющая применить решения уравнений для воздушных течей из [1] к азоту, кислороду и аргону. Найдены эмпирические коэффициенты для определения парциальных давлений и потоков этих компонентов воздуха.
2. Оценена быстрота действия насосов НМД-0.4 по кислороду и аргону, зависимость ее от давления и соотношение с быстротой действия по азоту, Полученные цифры находятся в соответствии с литературными данными для магнито-разрядных насосов.
3. Построены калибровочные кривые для давления компонентов воздуха в камере по току разряда откачивающих камеру насосов, полезные для практического применения.
4. Разработан относительно простой метод нахождения места течи для любой камеры, имеющей течь, не требующий отключения соседних насосов и знания потоков газа из соседних камер. Приведены конкретные данные о местах расположения течей в каждой камере У-70.

5. Описанная методика позволяет вычислить местонахождение труднонаходимых течей, например при большой длительности прохождения или из-за плохих условий доступа гелия.
6. Течи можно определять во время сеанса работы ускорителя по специальной программе.
7. Произведена оценка спектра остаточного газа и среднего давления воздуха и аргона в камере ускорителя У-70, что имеет значение для изучения рассеяния протонного пучка.

В случае повышения точности измерения давления (например, измеряя его масс-спектрометрами), погрешность определения места течи может быть уменьшена, что сделает данный метод поиска течей более перспективным. Результаты данной работы представляют определенный интерес как для отдельных вакуумных камер, так и для протяженных камер электрофизических установок, откачиваемых магниторазрядными насосами.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность О.П. Лебедеву за поддержку работы.

Список литературы

- [1] А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев. Герметичность вакуумной камеры протонного синхротрона У-70. – Препринт ИФВЭ 2009-11, Протвино, 2009.
- [2] А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев. Оценка потока газовой выделенности и других параметров вакуумной камеры У-70. – Препринт ИФВЭ 2009-10, Протвино, 2009.
- [3] В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев. Измерение давления в вакуумной камере синхротрона У-70 по токам разряда магниторазрядных насосов, откачивающих камеру. – В сб.: Труды XIX совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 2004.
- [4] А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Е.А. Пенчко. Конструирование и расчет вакуумных систем. – М.: Энергия, 1970.

- [5] В.А. Ланис, Л.Е. Левина. Техника вакуумных испытаний. – М.: Госэнергоиздат, 1963.
- [6] Г.Л. Саксаганский. Электрофизические вакуумные насосы. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [7] А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, К.Г. Мирзоев. Исследование некоторых параметров магниторазрядных насосов вакуумной системы У-70. – Препринт ИФВЭ 2001-21, Протвино, 2001.
- [8] Д. Кирьянов. Mathcad 11. Самоучитель. – СПб.: «БХВ-Петербург», 2004, 236.

Рукопись поступила 10 февраля 2011 г.

А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев
Исследование вакуумной камеры протонного синхротрона У-70.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 17. 02. 2011. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ. л. 1,38. Уч.- изд. л. 2,1. Тираж 80. Заказ 24. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2011-1, ИФВЭ, 2011
