



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009–11
ОУ У-70

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

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

Протвино 2009

Аннотация

Кивер А.М., Лапыгин В.Г., Ларионов А.В., Мирзоев К.Г. Герметичность вакуумной камеры протонного синхротрона У-70: Препринт ИФВЭ 2009-11. – Протвино, 2009. – 9 с., 5 рис., библиогр.: 6.

Разработана методика измерения герметичности вакуумной камеры протонного синхротрона У-70. Приведены результаты решения дифференциальных уравнений, позволяющие определить место течи в камере по измерениям токов магнитоэрозийных насосов.

Abstract

Kiver A.M., Lapygin V.G., Larionov A.V., Mirzoev K.G. The Tightness of Vacuum Chamber of the Proton Synchrotron U-70: IHEP Preprint 2009-11. – Protvino, 2009. – p. 9, figs.5, refs.: 6.

The calculation of the tightness vacuum chamber of the U-70 has been developed. The results of the solution of differential equations for distribution of the discharge current of the sputter-ion pumps are presented in order to detect of the leaks location in the vacuum chamber.

Достижение достаточной герметичности камеры является одной из основных проблем для вакуумных систем крупных электрофизических установок, к которым относится протонный синхротрон У-70. Высокая степень герметичности должна достигаться за счет уменьшения потока натекания в камеру извне через микронеплотности или течи в местах сварочных и уплотнительных соединений камер и их узлов. Этот поток должен быть минимальным, чтобы обеспечить возможность получения необходимого рабочего давления в камере и хорошие условия для высоковакуумных магниторазрядных насосов НМД-0,4, работающих недостаточно стабильно при больших потоках натекания из-за нагрева повышенными токами разряда. В условиях вакуумной системы У-70 процесс поиска течей при сборке и эксплуатации системы затруднен из-за большой протяженности вакуумной камеры по длине и относительно малого количества мест, к которым могут быть подключены течеискатели. Целью настоящей работы является оценка величины течей и распределения их по камерам, а также разработка методики, позволяющей приблизительно определить места расположения отдельных течей в вакуумных камерах. Ввиду того, что поперечные размеры камер малы по сравнению с их протяженностью, в качестве координаты выбрана длина камеры x , вдоль которой меняется давление P . Исследование герметичности камер проводилось путем анализа распределения разрядных токов магниторазрядных насосов НМД-0,4, откачивающих камеру. В работе [1] насосы использовались как манометрические преобразователи для оценки величины среднего давления остаточного газа в вакуумной камере. В настоящей работе, являющейся продолжением [1], насосы используются в качестве своего рода течеискателей, причем по значению тока разряда насоса можно судить о величине потока течи, а по разнице токов соседних насосов – о ее местонахождении.

Давление в камере определяется газовыделением внутренней поверхности и натеканием извне через необнаруженные течи. Поэтому можно предположить, что остаточный газ камеры У-70 состоит из двух основных компонентов – водорода и воздуха. Воздух состоит из смеси газов, главным из которых является азот, с небольшой примесью кислорода и аргона. Поэтому под давлением воздуха будем в дальнейшем иметь в виду давление азота. Согласно закону Дальтона давление смеси газов в камере равно сумме парциальных давлений отдельных компонентов. Отсюда следует, что каждый из этих газов «ведет себя» так, как если бы он один занимал весь объем камеры. Быстрота действия насосов НМД-0,4 измерялась в работе [2]. Быстрота действия по азоту, по крайней мере в диапазоне $5 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст., не должна зависеть от наличия водорода, так как на титановых пластинах ячеек насоса имеется достаточное число центров адсорбции, а механизмы откачки магниторазрядным насосом азота и водорода различны: азот ионизируется в токе разряда, а водород хемосорбируется распыленной пленкой титана. Исходя из вышеизложенного, изменение давления каждого из этих газов в указанном

диапазоне может быть описано разными уравнениями, характеризующими именно этот газ, и рассматриваться независимо друг от друга для условий вакуумной системы У-70. Поэтому можно исследовать герметичность камер У-70, если определить давление по азоту, зависящее только от натекания через течи. Для этого из суммарного давления смеси надо вычесть давление водорода, являющееся результатом газовыделения внутренней поверхности стенок камеры. Методика измерения потока газовой выделению и давления водорода в камере изложена в предыдущей работе [3]. Эти измерения проводились на участках с минимальными токами разряда насосов.

В работе [1] приведены соотношения, связывающие давления водорода и воздуха в камере с величинами разрядного тока насоса по этим газам. Вычислив по [1] давление водорода в местах присоединения патрубков насосов к камере, можно определить соответствующий этому давлению ток разряда по водороду каждого насоса I_H . Так как ток разряда является суммой токов, соответствующих водороду и воздуху, то ток разряда по воздуху I_T можно определить, вычтя I_H из измеренного общего тока разряда насоса I . Зная I_T , нетрудно по соотношению из [1] определить соответствующее значение давления воздуха (азота) P . Так как речь идет о герметичности и натекании, то под обозначением P подразумевается давление воздуха без индексов и специальных оговорок. Поток натекания Q_T в каждую камеру через течи, равный потоку воздуха, откачиваемому насосом из этой камеры $Q_T = Q_{отк}$, можно определить как произведение давления P_i в камере у патрубка i -го насоса на S -эффективную быстроту действия по воздуху или азоту в этом сечении. Распределение вычисленных значений $Q_{отк}$ по длине кольцевой камеры У-70 в весеннем 2002 года сеансе работы ускорителя приведено на рис. 1 и 2.

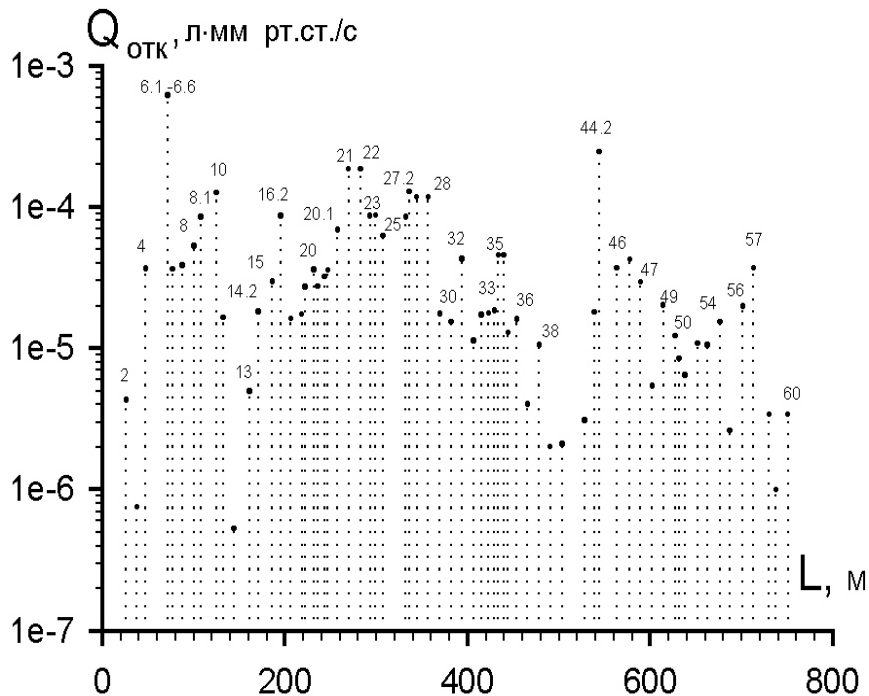


Рис. 1.

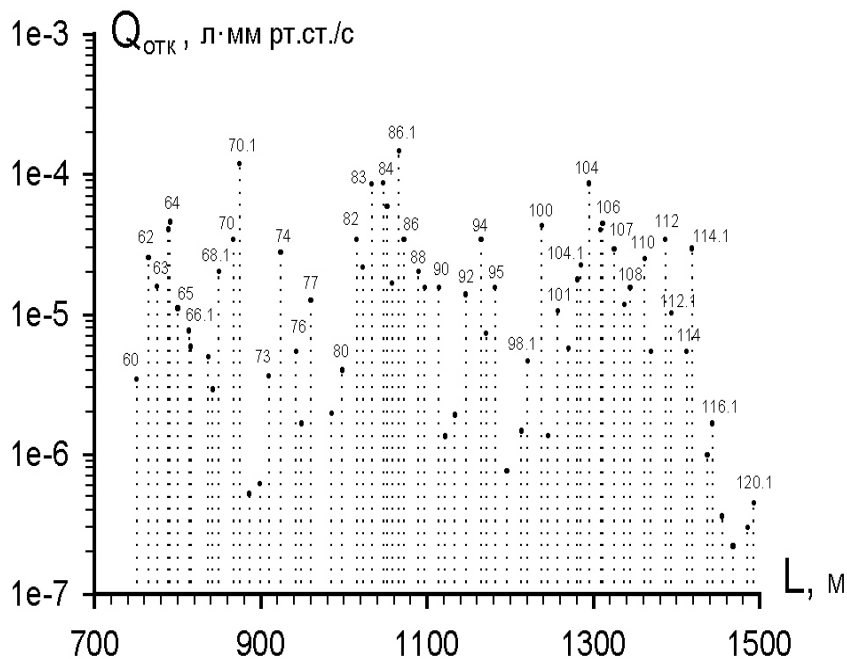


Рис. 2.

Рис. 1, 2. Распределение потоков натекания, откачиваемых насосами, по длине камеры и по номерам насосов в весеннем 2002 года сеансе работы ускорителя.

Как видно из рисунка, наибольшую величину имеют значения потоков натекания, откачиваемые насосами на участках кольца между осями 4 и 35. Это соответствует худшей герметичности ввиду наличия здесь каналов ввода и вывода, расширенных камер, боксов септум- и кикер-магнитов, мишенных патрубков и других устройств со сложной конструкцией.

По степени герметичности все камеры У-70 можно разделить на три основные группы: камеры без течи, с течью в трубопроводе от насоса к камере или вблизи него (в дальнейшем будем называть его патрубком насоса) и камеры с произвольным расположением течи. В случае отсутствия течи согласно закону сохранения потока должно выполняться следующее условие: поток газа, откачиваемый каждым насосом, должен равняться сумме потоков, приходящих к данному насосу слева и справа от двух соседних камер. В соответствии с основным уравнением вакуумной техники [4] поток Q между двумя сечениями трубопровода равен произведению разности давлений между ними на проводимость этого отрезка трубопровода U :

$$Q = U(P_2 - P_1). \quad (1)$$

Тогда указанное выше условие отсутствия течи для i -й камеры имеет вид:

$$(P_{i+1} - P_i) \frac{u_0}{l_i} + (P_{i-1} - P_i) \frac{u_0}{l_{i-1}} = P_i S, \quad (2)$$

где $u_0 = Ul$ л·см/с – удельная проводимость отрезка трубопровода длины l и проводимости U ; P_{i+1}, P_i, P_{i-1} – давление в камере в местах присоединения патрубков насосов; l_{i-1} и l_i – длины камер, которые приняты равными разности между координатами патрубков двух соседних насосов: $l_{i-1} = x_i - x_{i-1}$, $l_i = x_{i+1} - x_i$. Следует отметить, что течи полностью отсутствуют не более чем у 10% камер У-70. Еще примерно у 5–10% камер величиной натекания через течи можно пренебречь, учитывая 40%-ную точность измерения давления. Если течь в камере

отсутствует, то разрядный ток насоса данной камеры обычно меньше, чем у насосов соседних камер. О наличии течи в камере, кроме повышенного тока разряда насоса, можно судить, поочередно отключая насосы данного участка и измеряя приращение давления по возрастанию токов у двух насосов, соседних с отключенным. Конечно, при этом следует учитывать и соответствующее увеличение давления водорода. Рассмотрим группу камер, у которых течи расположены в патрубке насоса. Этот случай схематически изображен на рис. 3.

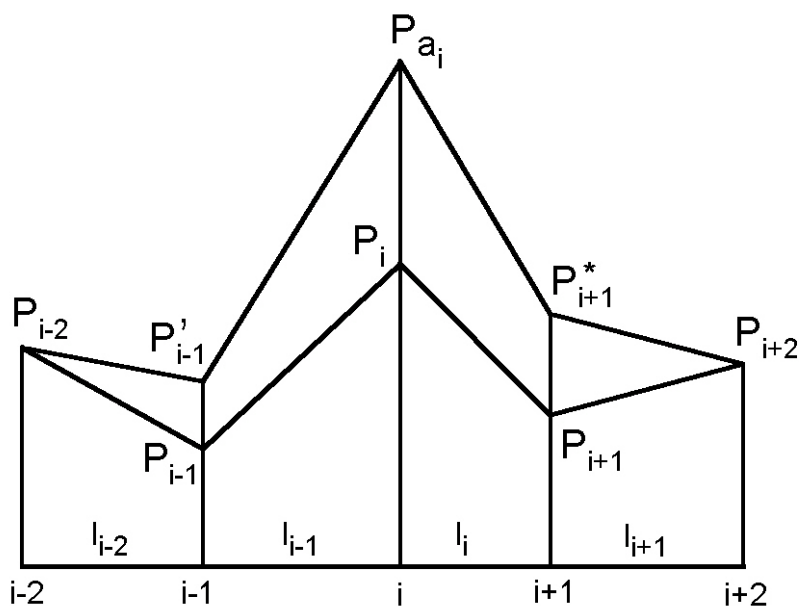


Рис. 3. Схема изменения давления в четырех камерах с течами в патрубках насосов.

Пусть до отключения насосов значения давлений в камерах у трех последовательно расположенных насосов были P_{i-1}, P_i и P_{i+1} . Допустим, что отключен i -й насос. Для удобства в дальнейшем будем отмечать изменившееся давление в патрубке соседнего насоса апострофом P'_{i-1} , если отключенный насос находится справа и звездочкой P^*_{i+1} , если отключенный насос слева. Приращения давления в патрубках соседних с i -м насосов равны: $\Delta P'_{i-1} = P'_{i-1} - P_{i-1}$ и $\Delta P^*_{i+1} = P^*_{i+1} - P_{i+1}$. Строго говоря, давление должно было измениться в патрубках большего числа насосов, чем два соседних, так как после выключения i -го насоса изменились условия равновесия на участке. Однако из-за большого расстояния между насосами и достаточного запаса по скорости действия изменений тока у $i-2, i+2$ и других насосов практически не наблюдается и ими можно пренебречь по сравнению с $i-1, i+1$. Считаем, что на участке рис. 3 течи либо отсутствуют, либо они расположены в патрубках насосов. Если течь находится в патрубке i -го насоса, то после его отключения давление в патрубке возрастет до P_{a_i} . Изменение потока, откачиваемого насосом $i-1$ в результате отключения насоса i , имеет вид:

$$\Delta P'_{i-1} S = (P_{a_i} - P_i) \frac{u_0}{l_{i-1}} - \Delta P'_{i-1} u_0 \left(\frac{1}{l_{i-1}} + \frac{1}{l_{i-2}} \right). \quad (3)$$

Аналогичное изменение откачиваемого потока для насоса $i + 1$ равно

$$\Delta P_{i+1}^* S = (P_{a_i} - P_i) \frac{u_0}{l_i} - \Delta P_{i+1}^* u_0 \left(\frac{1}{l_{i+1}} + \frac{1}{l_i} \right). \quad (4)$$

Выражая из (3) и (4) прирост давления $(P_{a_i} - P_i)$ и исключая его, получим

$$\frac{\Delta P_{i-1}'}{\Delta P_{i+1}^*} = \frac{u_0(1 + l_i/l_{i+1}) + l_i S}{u_0(1 + l_{i-1}/l_{i-2}) + l_{i-1} S}. \quad (5)$$

Соотношение (5) является простым и удобным критерием, связывающим известные и измеряемые величины. Если камера хотя бы приближенно удовлетворяет (5), то течь находится в патрубке или вблизи патрубка насоса. При близких величинах длин соседних камер приращения давлений с обеих сторон равны. Для большинства камер У-70 удельная проводимость почти на порядок меньше произведения быстроты действия на длину камеры. Тогда выражением, зависящим от u_0 , в числителе и знаменателе правой части (5) можно пренебречь и приращения давлений оказываются обратно пропорциональными длинам камер. Оба этих следствия соответствуют здравому смыслу, что подтверждает полученный критерий. Величину течи Q_T в данном случае можно определить из следующего соотношения:

$$Q_T = P_i S - (P_{i+1} - P_i) \frac{u_0}{l_i} - (P_{i-1} - P_i) \frac{u_0}{l_{i-1}}. \quad (6)$$

Рассмотрим теперь наиболее сложный случай – определение места течи при произвольном его расположении в камере, схематически показанный на рис. 4. Места расположения течей обозначены a_{i-1}, a_i, a_{i+1} .

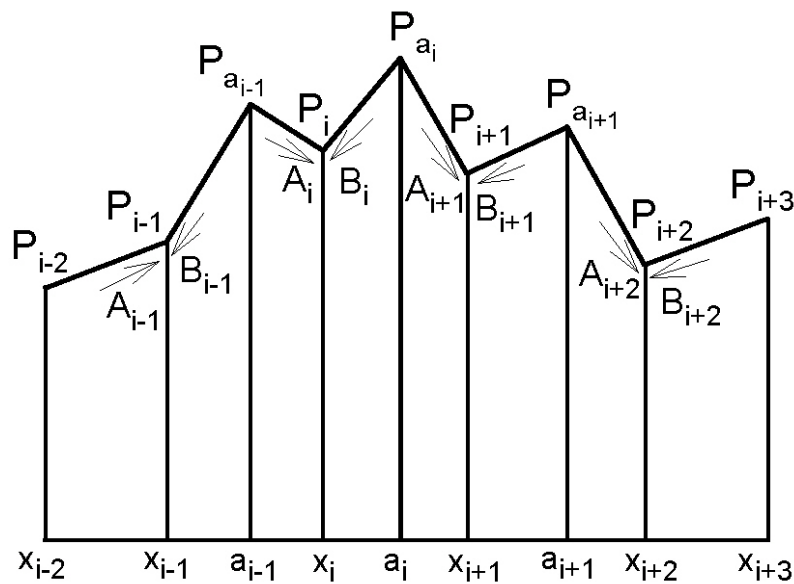


Рис. 4. Схема изменения давления от мест течи к патрубкам насосов в случае участка из трех камер, имеющих течи, а камеры в начале и конце участка – без течи. Стрелками показано направление потоков А и В.

Потоки натекания, приходящие в патрубки насосов слева, обозначим буквой A , а справа – буквой B , как показано на схеме рис. 4. Будем считать, что на i -й камере имеется течь, находящаяся в точке a_i , которую необходимо найти, а по крайней мере, на одной из соседних

камер – $i-1$ или $i+1$ – течи нет или ее положение и распределение давлений известно. Геометрические размеры вакуумных течей очень невелики, поэтому течь можно считать точечным источником газа и характеризовать ее с помощью импульсной δ – функции Дирака [5]. Тогда в рассматриваемом промежутке $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ изменение давления в камере можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$u_0 \frac{d^2 P}{dx^2} = -Q_i \delta(x - a_i), \quad (7)$$

где Q_i – величина потока течи л·тор/с. Общее решение уравнения (7) имеет вид:

$$P(x) = -\frac{Q_i}{2u_0} |x - a_i| + \frac{C_1}{u_0} x + \frac{C_2}{u_0}, \quad (8)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 могут быть найдены из следующих граничных условий, представляющих собой потоки, откачиваемые насосами на концах i – й камеры:

$$x = x_i, \quad u_0 \frac{dP}{dx} + A_i = SP; \quad x = x_{i+1}, \quad -u_0 \frac{dP}{dx} + B_{i+1} = SP, \quad (9)$$

где потоки A_i и B_{i+1} – имеют указанный выше физический смысл и их значения считаются известными. Во втором граничном условии перед производной должен быть знак минус, так как слева от точки x_{i+1} приращение давления отрицательно при положительном приращении координаты x . При этих условиях, а также с учетом того, что $|x_i - a_i| = a_i - x_i$ и $|x_{i+1} - a_i| = x_{i+1} - a_i$, из решения уравнения (7) можно получить значения давлений в камере у патрубков насосов в следующем виде:

$$P_i = \frac{Q_i [u_0 + S(x_{i+1} - a_i)] + u_0 (A_i + B_{i+1}) + SA_i l_i}{S(2u_0 + Sl_i)}, \quad (10)$$

$$P_{i+1} = \frac{Q_i [u_0 + S(a_i - x_i)] + u_0 (A_i + B_{i+1}) + SB_{i+1} l_i}{S(2u_0 + Sl_i)}. \quad (11)$$

Из этих выражений можно определить неизвестные параметры течи a_i и Q_i . Из (10) и (11) после преобразований можно получить следующее соотношение:

$$(P_i + P_{i+1})S = Q_i + A_i + B_{i+1}, \quad (12)$$

которое выражает собой равенство потоков поступающего и откачиваемого газа в i – й камере и подтверждает правильность полученного решения. В случае, если с обеих сторон рассматриваемой i – й камеры находятся камеры без течи или с известной течью, то A_i и B_{i+1} известны и параметры течи a_i и Q_i можно определить из (10) – (12). Однако такие камеры на У-70 сравнительно редки. Больше камер, у которых известна только одна из величин A_i , B_{i+1} или неизвестны обе. В этих случаях число уравнений для определения параметров течи меньше числа неизвестных и для решения проблемы нахождения места течи необходимы другие уравнения, которые, в частности, могут быть получены, как указывалось выше, путем последовательного поочередного отключения насосов.

Для получения новых данных рассмотрим i – ю камеру, для которой поток A_i считаем известным, а течь величиной Q_i находится в a_i и $x_i \leq a_i \leq x_{i+1}$. Так как в районе течи молекулы газа распределены симметрично и их движение не зависит от столкновений между собой, а только от соударений со стенкой трубопровода, то натекающий через течь газ будет распро-

страняться с одинаковой вероятностью влево и вправо от сечения a_i и потоки натекания к патрубкам насосов i и $i+1$ будут одинаковы и равны $Q_i/2$. Тогда поток, откачиваемый i -м насосом, равен $SP_i = A_i + Q_i/2$. Отсюда можно определить Q_i , так как A_i известно. Из решения уравнения (7) при граничных условиях $x = x_i, P = P_i; x = x_{i+1}, P = P_{i+1}$ можно получить следующее соотношение:

$$Q_i(x_i + x_{i+1} - 2a_i) = 2u_0(P_i - P_{i+1}), \quad (13)$$

откуда определяется искомое место расположения течи a_i . Из вышеизложенного следует, что поток натекания в патрубок $i+1$ -го насоса из i -й камеры равен $A_{i+1} = Q_i/2$, что позволяет определить значения величин Q_{i+1} и a_{i+1} . Так, последовательно передвигаясь от одной камеры к следующей, можно определить параметры всех текущих камер. Аналогичным образом, в случае необходимости, можно найти параметры камер, расположенных слева от i -й камеры, пользуясь равенством $SP_i = B_i + Q_{i-1}/2$, где B_i – известный поток натекания из i -й камеры в i -й патрубок. Очевидно, что в случае отсутствия течи в $i-1$ -й камере

$$A_i = (P_{i-1} - P_i) \frac{u_0}{x_i - x_{i-1}}, \text{ а в отсутствие течи в } i\text{-й камере } B_i = (P_{i+1} - P_i) \frac{u_0}{x_{i+1} - x_i}.$$

Если течей нет в обеих камерах $i-1$ и i , то $A_i + B_i = SP_i$. Следует отметить, что число камер, исследуемых в правую и в левую стороны от камеры с известными параметрами, не должно быть большим, желательно не более 2–3. Это обусловлено невысокой точностью измерения давления, из-за чего ошибки определения мест течей, складываясь, могут быть очень большими. Если для камер $i-1$ и i известны места течей a_{i-1}, a_i , а значит и давления в этих точках

$$P_{a_{i-1}}, P_{a_i}, \text{ то } A_i = (P_{a_{i-1}} - P_i) \frac{u_0}{x_i - a_{i-1}}, B_i = (P_{a_i} - P_i) \frac{u_0}{a_i - x_i}.$$

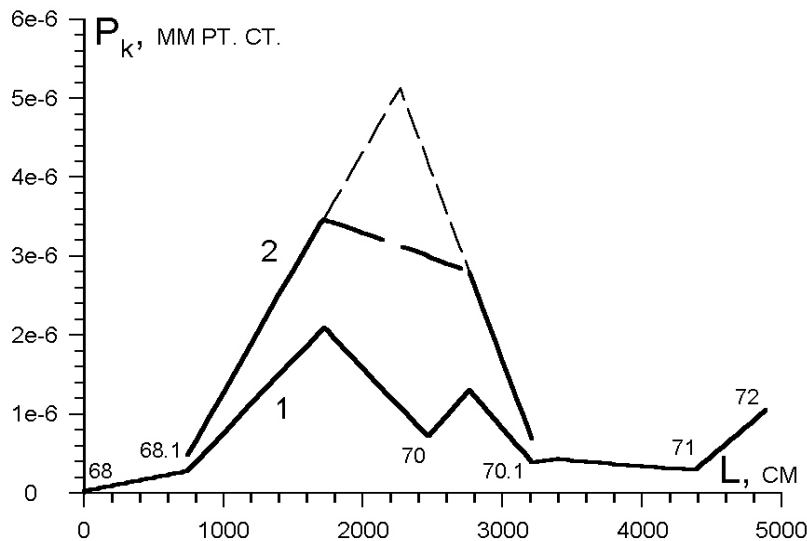


Рис. 5. График изменения давления по длине камер на участке между патрубками насосов 68 и 72: 1 – работают все насосы; 2 – отключен насос камеры 70.

На рис. 5 показано распределение давления на участке камер насосов 68 – 72, рассчитанное описанным выше способом по реально измеренным токам насосов. Как видно, в камерах

68.1, 70 и 70.1 есть течи. За начало координаты x на графике рис. 5 принято начало 68-й камеры.

Имеется принципиальная возможность оценки параметров герметичности произвольной i -й камеры, у которой с обеих сторон находятся камеры, также имеющие течи. Для этого надо решать уравнение (7) для i -й камеры с граничными условиями: $x = x_i$, $P = P_i$; $x = x_{i+1}$, $P = P_{i+1}$ и для $i+1$ -й камеры при условиях: $x = x_{i+1}$, $P = P_{i+1}$; $x = x_{i+2}$, $P = P_{i+2}$. Получив уравнения (13) этих камер, для нахождения соотношений, связывающих a_i с a_{i+1} и Q_i с Q_{i+1} , временно отключим $i+1$ -й насос и рассмотрим уравнение, аналогичное (7) для камеры длиной $x_{i+2} - x_i$ с двумя течами в точках a_i и a_{i+1} :

$$u_0 \frac{d^2 P}{dx^2} = -Q_i \delta(x - a_i) - Q_{i+1} \delta(x - a_{i+1}), \quad (14)$$

с граничными условиями: $x = x_i$, $P = P'_i$; $x = x_{i+2}$, $P = P_{i+2}^*$ (апостроф и звездочка указывают, как и ранее, на то, что отключенный насос находится справа или слева от места измерения давления). Если принять за i -ю камеру уже изученную 68.1, то все параметры i -й и $i+1$ -й камер будут известны и можно построить график согласно решению уравнения (14), показывающий, как меняется давление на участке 68.1 – 70.1 после отключения насоса 70 (рис. 5, кривая 2). Жирный пунктир проведен по решению уравнения (14), тонкой линией показано, как должно было бы меняться давление, если бы на участке была одна течь, эквивалентная по своему действию обоим имеющимся течам. Из решения уравнения (14) можно определить значения дополнительных потоков натекания в патрубки насосов i и $i+2$ после отключения насоса 70: ΔQ_{x_i} и $\Delta Q_{x_{i+2}}$, а также показать, что их отношение обратно пропорционально отношению расстояний от этих насосов до соответствующей течи, то есть $x_{i+2} - a_{i+1}$ и $a_i - x_i$. Это подтверждается измерениями на камерах и других участках с хорошей точностью и представляется вполне логичным выводом, так как соответствует пропускным способностям этих отрезков камер. Кроме того, справедливо равенство $P_{i+1} S = \frac{1}{2} (Q_i + Q_{i+1})$, так как

$i+1$ -й насос до того, как был отключен, откачивал по половине потока течи с каждой стороны из камер i и $i+1$. Эти два дополнительных соотношения вместе с соотношениями (13) для камер i и $i+1$ составляют систему алгебраических уравнений с 4 неизвестными, которую можно решить численно с помощью компьютерной математической системы Mathcad [6] и таким образом определить значения a_i , Q_i , a_{i+1} и Q_{i+1} независимо от величин каких-либо потоков A и B . Неудобство данного метода заключается в необходимости отключения некоторых насосов, что не всегда возможно во время сеанса. Поэтому такой метод, несмотря на его универсальность, менее удобен на практике, чем описанный выше способ исследования герметичности группы камер, находящихся рядом с камерой, параметры которой известны. Очевидно, имеет смысл комбинация и взаимная проверка обоих методов.

Таким образом, для исследования герметичности какого-либо участка кольцевой камеры необходимо и достаточно, чтобы среди камер этого участка имелась хотя бы одна камера без течи, или с течью, место и величина которой известны. Тогда, смещаясь от этой камеры в правую или левую сторону, можно последовательно определить все течи на этом участке.

При вычислении места расположения течи необходимо оценить точность его определения по предлагаемой методике. Очевидно, что если a_i определяется по измерениям давления на стыках соседних камер, то погрешность не может быть меньше точности определения давления по току разряда насоса. Токи большинства насосов У-70 соответствуют давлению

в диапазоне $5 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. Из результатов исследования параметров насосов НМД-0,4 в работе [2] следует, что точность градуировки давления по току разряда насоса в этом диапазоне давлений составляет $\pm 5\%$. Можно принять эту величину в качестве минимальной погрешности определения a_j . Длина большинства камер У-70 не превышает 12 м. Поэтому расстояние от места возможной течи до ближайшего конца камеры не больше, чем половина длины камеры или $6 \cdot 10^3$ см. Следовательно, оптимистическая оценка точности определения места течи составляет величину порядка ± 30 см. Вопрос о точности вычисления потока течи не представляет практического интереса. Таким образом, данный метод ввиду недостаточно высокой точности локализации течи пока что не может конкурировать с традиционным способом поиска течей гелиевым течеискателем. Тем не менее, рассмотренная выше методика имеет ряд особенностей, к числу которых можно отнести следующие:

1. Значительно сужается район поиска течи, указывая на ближайший к вычисленной величине a_j сварочный шов или уплотнение, что существенно уменьшает время поисков течи.
2. Можно найти течи, которые трудно обнаружить с помощью течеискателя из-за большой длительности прохождения гелия через длинный канал сложной формы.
3. Течи могут определяться дистанционно и заблаговременно, во время сеанса работы ускорителя, уменьшая тем самым затраты времени на профилактику.
4. Поиски и определение величины течей могут производиться без участия оператора по заранее составленной программе выборочного отключения, измерения и анализа токов насосов. Такая программа позволяет автоматически зафиксировать появление небольшой течи задолго до ее опасного возрастания.
5. Данный метод позволяет, в случае необходимости, надежно определять величину потока течи (что не просто сделать с помощью течеискателя) и таким образом выявить наиболее крупные течи, на которые надо обратить внимание в первую очередь.
6. После модернизации системы измерения разрядных токов насосов и повышения точности измерения давления погрешность определения места течи может быть значительно уменьшена, что сделает рассмотренный метод конкурентоспособным течеискателю.

Основным результатом проведенных исследований является разработка методики определения места течи в вакуумной камере по токам разряда магниторазрядных насосов, представляющей интерес и имеющей практическое значение для протяженных вакуумных систем с большим количеством однотипных электрофизических насосов.

Список литературы

- [1] В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев. Измерение давления в вакуумной камере синхротрона У-70 по токам разряда магниторазрядных насосов, откачивающих камеру. XIX Собрание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 2004.
- [2] А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, К.Г. Мирзоев. Препринт ИФВЭ 2001-21, Протвино, 2001.
- [3] 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.
- [4] С. Дэшман. Научные основы вакуумной техники. – М.: Мир, 1964.
- [5] Д. Иваненко и А. Соколов. Классическая теория поля. – М.-Л.: ГИТЛ, 1949.
- [6] Д. Кирьянов. Mathcad 11. Самоучитель. – СПб, «БХВ-Петербург», 2004, 236.

Рукопись поступила 25 июня 2009 г.

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

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 25.06.2009. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ. л. 1,375. Уч.- изд. л. 1,1. Тираж 80. Заказ 40. Индекс 3649.

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

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2009-11, ИФВЭ, 2009
