



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009–10
ОУ У-70

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

**ОЦЕНКА ПОТОКА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ
И ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ У-70**

Протвино 2009

Аннотация

Кивер А.М., Лапыгин В.Г., Ларионов А.В., Мирзоев К.Г. Оценка потока газовой выделенности и других параметров вакуумной камеры У-70: Препринт ИФВЭ 2009-10. – Протвино, 2009. – 11 с., 5 рис., библиогр.: 7.

Разработана методика оценки величины потока газовой выделенности поверхности вакуумной камеры протонного синхротрона У-70 по измерению минимальных токов магниторазрядных насосов на отдельных участках камеры. Определено значение потока, среднего давления водорода и других параметров. Полученные результаты подтверждены решениями уравнений и графиками, построенными согласно экспериментальным значениям токов разряда насосов.

Abstract

Kiver A.M., Lapygin V.G., Larionov A.V., Mirzoev K.G. The Estimation of the Outgassing Rate Flow and Other Parameters of Vacuum Chamber of the U-70: IHEP Preprint 2009-10. – Protvino, 2009. – p. 11, figs. 5, refs.: 7.

The estimation of the outgassing rate flow from the surface of vacuum chamber of the U-70 proton synchrotron has been developed by means of the measurement minimal discharge currents of the sputter-ion pumps on some parts of the chamber. The values of this flow, average pressure of the hydrogen and other parameters of chamber are introduced. The results are in accordance with the solution of the equations and with the plots of experimental data.

Потери интенсивности протонного пучка за счет рассеяния на остаточном газе в процессе работы синхротрона У-70 зависят от среднего давления в вакуумной камере ускорителя. Определение среднего давления связано с некоторыми трудностями из-за отсутствия преобразователей, измеряющих давление в камере во время сеанса. Целью настоящей работы является разработка методики оценки потока газовой выделенности и среднего давления водорода (а затем и воздуха) в вакуумной камере по измерениям токов разряда насосов НМД-0,4, которые установлены достаточно часто вдоль камеры. Это позволяет определить давление в камере в промежутках между магнитными блоками и рассчитать среднее давление на участке камеры любой длины.

Для определения давления по току разряда насосов можно использовать результаты работы [1], в которой проведена градуировка тока разряда по давлению на входе в насос, с учетом того, как могут измениться параметры, измеренные на стенде, для насосов, работающих в условиях вакуумной системы У-70. Новая вакуумная камера ускорителя не прогревалась в процессе подготовки к монтажу и поэтому могла быть недостаточно очищена от органических загрязнений. Источником органических веществ являются и пары масел, проникающих в камеру из турбомолекулярных насосов постов предварительной откачки, а также резиновые прокладки уплотнений некоторых узлов. Для оценки влияния загрязнений можно провести сравнение вакуумных систем У-70 и линейного ускорителя И-100 [2]. Резонаторы этого ускорителя полировались с применением значительного количества вакуумного масла, в результате чего в начальный период откачки в спектре их остаточного газа наблюдалось до 10% углеводородов, а магниторазрядные насосы НЭМ-1Т в 2 раза снизили быстроту действия из-за загрязнения органикой. После очистки и тренировки содержание углеводородов снизилось до 2 - 3%, сохранявшихся за счет резиновых уплотнений, с помощью которых собрана вся вакуумная система И-100. После нескольких лет эксплуатации магниторазрядные насосы полностью восстановили свои параметры, как показали измерения на насосах, снятых с резонаторов в периоды останова. Очевидно, вакуумные условия на ускорителе У-70 в настоящее время не хуже, чем на очищенном И-100, так как поверхность резиновых прокладок, приходящихся на один насос, на порядок меньше, а предельный вакуум в камере У-70 в 2-3 раза лучше, чем в резонаторах И-100. К тому же большая часть насосов НМД-0,4 после пускового периода была заменена на новые. В каждом сеансе работы ускорителя камера очищается обработкой ионами разряда, проникающего в камеру при больших токах в насосах в процессе запуска системы. В результате нагрева повышенными токами насосы также очищаются и выделяют продукты распада загрязнений, которые откачиваются постами предварительной откачки при их длительной совместной работе с насосами НМД-0,4. В течение сеанса практически полностью откачиваются пары воды, а углеводородные молекулы, распадаясь, в конечном счете дают водород и окись углерода. Поэтому можно считать, что быстрота действия насосов НМД-0,4 соответствует измеренной

в [1], а остаточный газ камеры во второй половине сеанса состоит из воздуха, СО и водорода, а также небольшой примеси до 3% легких углеводородов. Следует отметить, что для большинства камер крупных электрофизических установок такой состав остаточного газа (кроме углеводородов) наблюдается на практике после достаточно длительной откачки в течение 200-300 часов. Два главных компонента имеют массовые числа соответственно 28 (азот и СО) и 2 (водород), причем азот проникает в камеру как основной компонент натекающего через неконтролируемые течи атмосферного воздуха, а водород и СО являются продуктами газовой-деления стенок. Соотношение между этими компонентами рассмотрено ниже. Несмотря на незначительное содержание, органические примеси оказывают влияние на величину давления, измеряемого по току насосов. Как указывается в [3], быстрота действия диодных насосов для большинства легких углеводородов приблизительно вдвое превышает быстроту действия по воздуху. Токи через насос при одинаковом давлении также сравнимы с азотом, хотя для некоторых углеводородов они могут быть выше примерно вдвое. Тогда при использовании градуировки давления по току насоса из [1], доля органических примесей завышается, в среднем, в 1,5-2 раза относительно ее реального значения. Поэтому при указанном выше процентном содержании примесей измеренное суммарное давление компонентов может быть на 5 - 6% выше, чем реальное давление в камере, что вполне приемлемо. Таково вероятное влияние возможных органических загрязнений камеры ускорителя.

Ток разряда насосов НМД-0,4, работающих на ускорителе, соответствует давлению над их входным патрубком. Для определения давления в камере надо найти зависимость между значениями давления у входа в насос и внутри камеры у откачных окон. Конструктивной особенностью вакуумной системы У-70 является относительно большая длина трубопроводов, соединяющих насосы НМД-0,4 с камерой. Эта длина превышает 1 м, что обусловлено размерами обмотки полюсов электромагнитов. Трубопровод собран с помощью сварных и разборных соединений и состоит из коллектора с сифонной развязкой и раструба. Расчет пропускной способности узлов трубопровода не представляет трудности, за исключением раструба, имеющего относительно сложную геометрическую форму. Сечение раструба постепенно меняется по его длине от цилиндрической трубы у насоса до щелевого канала у камеры, вытянутого вдоль её горизонтальной оси. Схема геометрии раструба показана на рис. 1.

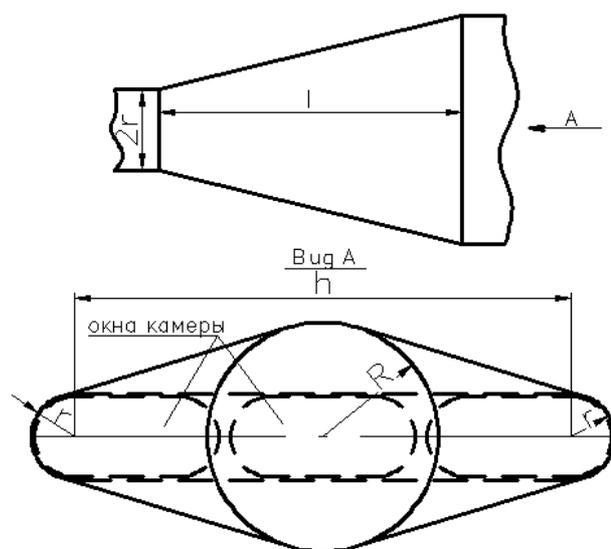


Рис. 1. Схема раструба.

Пропускную способность раструба можно рассчитать следующим образом. Сечение раструба со стороны камеры является суммой двух половин круга радиусом r и прямоугольника длиной h и шириной $2r$. Раструб можно рассматривать как длинный трубопровод ввиду того, что его пропускная способность мала по сравнению с пропускной способностью его концов. Тогда в молекулярном режиме течения, согласно фундаментальному соотношению Кнудсена [4], пропускная способность U трубопровода, имеющего на расстоянии x поперечное сечение F_x и периметр B_x , равна

$$U = \frac{4}{3} \frac{V_a}{\int_0^l \frac{B_x}{F_x^2} dx}, \quad (1)$$

где V_a – средняя арифметическая скорость молекул газа, а ось x направлена по оси симметрии раструба. При изменении длины от 0 до l параметры раструба должны меняться таким образом, чтобы в конце у насоса сечение представляло из себя круг радиусом R . Допуская, что геометрические параметры плавно меняются по x при сохранении формы раструба, получим

$$r_x = r + (R - r) \frac{x}{l}, \quad h_x = h \left(1 - \frac{x}{l}\right).$$

При этом в конце раструба прямоугольник в сечении исчезает и должны выполняться условия $x=0: r_x=r, h_x=h; x=l: r_x=R, h_x=0$. После преобразования B_x и F_x и подстановки $r=2,8$ см, $R=7,7$ см, $h=34,4$ см и $l=21$ см, получим значение интеграла в (1) равное $2,35 \cdot 10^{-2}$ см⁻². Для компонента остаточного газа с молекулярным весом $M=28$ при температуре $T=300$ К пропускная способность раструба из (1) равна 2660 л/с. Если считать форму раструба эллипсоидальной и произвести интегрирование для эллипса с осями $h_x + 2r_x$ и $2r_x$, с учетом того, что окружность радиуса R является частным случаем эллипса, получим значение пропускной способности на 25% меньшее приведенного выше. Это соответствует меньшей площади поперечного сечения эллипса по сравнению с фигурой рис. 1 и является косвенным подтверждением правильности полученного результата. Таким образом, раструб незначительно влияет на эффективную быстроту откачки камеры насосом НМД-0,4. Однако в целом трубопровод насоса не обеспечивает достаточно большой проводимости. Суммарная пропускная способность его элементов, включая три откачных окна камеры, не превышает 350 л/с по 28-й массе. Это снижает примерно в 2 раза эффективную быстроту действия насосов на входе в камеру и делает нецелесообразным использование для откачки камеры У-70 более мощных насосов, чем НМД-0,4. Соотношение между давлением в насосе P_H и давлением в камере у откачных окон P_K можно получить для стационарного состояния исходя из равенства откачиваемого насосом потока уходящему из камеры газовому потоку:

$$S_H P_H = u_H (P_K - P_H), \quad (2)$$

где S_H – быстрота действия насоса при давлении P_H у его входного фланца, а u_H – рассмотренная выше пропускная способность трубопровода между насосом и камерой. Согласно измеренным в [1] параметрам быстрота действия насоса НМД-0,4 по воздуху (или, что почти то же самое, по азоту) близка к $S_H=300$ л/с в широком диапазоне давлений $5 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. Известно, что быстрота действия по H_2 примерно вдвое превышает быстроту действия по N_2 [3]. Тогда S_H по водороду можно принять равной 600 л/с. Проводимость трубопровода от насоса к камере по водороду в молекулярном режиме течения газа должна быть в 3,75 раза больше, чем по массе 28 [4]. Используя эти данные, а также соотношение (2) и градуировку

давления по току [1], можно построить зависимости между током насоса и давлением в камере около трубопровода насоса для этих газов. Эти зависимости приведены в работе [5], а распределение давления в камере на участках между насосами НМД-0,4 можно получить с помощью решений уравнения из работы [6]. При выводе решений в этой работе предполагалось, что проводимость, периметр и поток газовой единицы поверхности камеры однородны и одинаковы по всей ее длине, а потоки натекания или повышенного газовойделения сосредоточены в районе патрубков насосов и входят в решение через граничные величины суммарного давления всех компонентов P_{Ki} и P_{Ki+1} , измеряемые экспериментально по токам этих насосов. В реальной вакуумной системе это не всегда выполняется. Если геометрия камер в магнитах одинакова, то между магнитами камеры соединены узлами различных типов, хотя число этих типов и невелико.

Газовыделение и натекание через течи распределены по камерам магнитоэлектрических насосов У-70 неравномерно. В наиболее неблагоприятных вакуумных условиях работают насосы на участках ввода и вывода из-за наличия на этих участках расширенных камер сложной конструкции, боксов септум- и кикер-магнитов, патрубков с мишенями, камер каналов и других устройств. Эти участки расположены, главным образом, между осями 4 и 35. Насосы, установленные на этих участках, имеют наиболее высокие токи разряда как в период запуска системы, так и в течение всего сеанса работы ускорителя. Это можно объяснить повышенным потоком газовойделения со стенок из-за возможных загрязнений, наличием относительно большого числа вводов обмоток, сварных швов и резиновых уплотнений, а также трудными условиями поиска течей при испытаниях на герметичность. Структура других участков с периодически расположенными магнитоэлектрическими насосами и шиберными затворами более или менее однородна и может в какой-то мере считаться регулярной структурой. Среднее расстояние между насосами составляет здесь около 1130 см, а в целом по кольцу 1230 см. Распределение разрядных токов насосов по длине кольцевой вакуумной камеры также не является равномерным.

Величина потока газовойделения является одним из важных параметров вакуумной камеры синхротрона У-70. Газовыделение характеризует степень чистоты камеры, что влияет на качество изоляции и электрическую прочность ускоряющих и высоковольтных промежутков внутри камеры. В установившемся режиме газовойделение обеспечивает постоянную составляющую газовой нагрузки на вакуумную систему, большую часть которой составляет натекание через течи в вакуумных уплотнениях. Поток газовойделения обусловлен, главным образом, диффузией водорода из материала стенки камеры на поверхность и зависит от качества предварительной подготовки камеры и степени ее тренированности. Как указывалось выше, основными компонентами остаточного газа в камере У-70 являются воздух, состоящий из смеси азота, кислорода и аргона, а также водород с окисью углерода, источники которых – натекание и газовойделение соответственно [5]. В вакуумных камерах электрофизических установок после 150-200 часов откачки поток газовойделения на 90-95% состоит из водорода [3,7]. Поэтому окисью углерода в газовойделении по сравнению с водородом можно пренебречь. При высоком вакууме движение молекул газа не зависит от соударения друг с другом и каждый из компонентов ведет себя так, как если бы он один был в камере. Механизмы откачки магнитоэлектрическими насосами азота и водорода различны, а быстрота действия в диапазоне $5 \cdot 10^{-8} \div 5 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст. мало зависит от давления [1]. Поэтому можно считать, что изменение давления каждого из основных компонентов остаточного газа в конце сеанса работы У-70 может быть описано уравнениями, характеризующими только этот компонент. Изменение давления водорода на $(i - 1)$ -м участке камеры между координатами x_{i-1} и x_i описывается уравнением

$$u_0 \frac{d^2 P}{dx^2} = -q, \quad (3)$$

где u_0 – удельная проводимость, P – давление водорода, а q – поток газовой выделения с единицы длины камеры. Граничные условия для уравнения (3) и его решение имеют вид:

$$x = x_{i-1}, \quad P = P_{i-1}; \quad x = x_i, \quad P = P_i, \quad (4)$$

$$P(x)_{i-1} = -\frac{qx^2}{2u_0} + x \left[\frac{P_i - P_{i-1}}{l_{i-1}} + \frac{q}{2u_0}(x_{i-1} + x_i) \right] - \frac{x_i}{l_{i-1}}(P_i - P_{i-1}) - \frac{qx_i x_{i-1}}{2u_0} + P_i, \quad (5)$$

где $l_{i-1} = x_i - x_{i-1}$. Для i -го участка камеры граничными условиями являются:

$$x = x_i, \quad P = P_i; \quad x = x_{i+1}, \quad P = P_{i+1}. \quad (6)$$

Решение уравнения (3) для i -го участка аналогично (5) с заменой $x_{i-1}, x_i, P_{i-1}, P_i$ соответственно на $x_i, x_{i+1}, P_i, P_{i+1}$ и l_{i-1} на $l_i = x_{i+1} - x_i$. Потоки водорода, приходящие в точку x_i с правой и с левой стороны, равны произведениям u_0 на производные обоих решений по координате справа и слева. Их сумма составляет поток, откачиваемый насосом, который равен произведению P_i на эффективную быстроту действия S у патрубка насоса:

$$-u_0 \frac{dP(x)_{i-1}}{dx} + u_0 \frac{dP(x)_i}{dx} = P_i S. \quad (7)$$

Производная слева отрицательна, так как здесь приращения давления и координаты противоположны по знаку. Из (7) можно получить следующее выражение:

$$\frac{q}{2}(l_{i-1} + l_i) + u_0 \left[\frac{P_{i-1}}{l_{i-1}} + \frac{P_{i+1}}{l_i} - P_i \left(\frac{1}{l_{i-1}} + \frac{1}{l_i} \right) \right] = P_i S. \quad (8)$$

Из уравнения (8) можно найти поток газовой выделения q , если известны значения давлений P_{i-1}, P_i и P_{i+1} , которые определяются по токам соответствующих магниторазрядных насосов согласно градуировочному соотношению, приведенному в [1,5]. Таким образом, если среди участков камеры У-70 найти три последовательно расположенные камеры насосов, где давление определялось бы только водородом, то можно вычислить величину q . В качестве таких районов или участков были выбраны участок из трех камер с номерами насосов 96, 98, 98.1, 100 и участок из пяти камер с номерами 116, 116.1, 117, 118, 120 и 120.1. Во многих сеансах работы с большой длительностью к концу сеанса токи магниторазрядных насосов, откачивающих эти участки, минимальны и близки к величине $1 \cdot 10^{-4}$ А. У всех остальных насосов вакуумной системы токи больше и имеют между собой значительный разброс по величине. Поэтому уместно предположить, что давление на подавляющем числе камер насосов определяется натеканием через течи, то есть главным образом азотом, а на камерах двух указанных групп течи либо совсем отсутствуют, либо поток через них существенно меньше потока газовой выделения. Действительно, величины q , определенные для камер этих групп по (8), мало отличаются между собой. Маловероятно, чтобы на всех этих камерах оказались одинаковые не найденные течи. Поэтому предположение о том, что на этих участках газовая нагрузка состоит, в основном, из водорода, вполне вероятно. Для дополнительной проверки поочередно отключались насосы 98, 98.1 и 116.1 ÷ 120 и измерялись приращения токов двух соседних насосов. Отношение приростов давления в их патрубках, как и ожидалось, близко к отношению приростов площади, приходящейся на каждый насос после отключения среднего насоса. Сумма приращений токов, как правило, меньше тока разряда отключаемого насоса. Причиной этого может быть ток утечки через изоляторы электродных блоков и ввода насоса. Определенный при этих измерениях ток утечки насосов НМД-0.4 вакуумной системы У-70 составляет, в среднем, $3,5 \cdot 10^{-5}$ А. Значение потока газовой выделения q было получено из (8) усреднением по всем указанным выше

камерам. После деления на длину периметра камеры среднее значение удельного потока газовой выделения с единицы ее поверхности составило $q_0 = 3 \cdot 10^{-10}$ л · мм рт. ст. · с⁻¹ · см⁻². Эта величина представляется вполне вероятной для камеры, не прогретой в вакууме и не прошедшей достаточной обработки аргонным разрядом. Во всяком случае, она может быть принята как оценка верхнего предела потока газовой выделения камеры У-70 и предпочтительнее для расчетов, чем литературные и справочные данные по газовой выделению нержавеющей стали близкого состава при заведомо других условиях и времени откачки. Для вакуумной системы с периодической регулярной структурой водородная нагрузка на каждый из одинаковых насосов равна потоку газовой выделения равных отрезков камеры между серединами двух соседних участков, а давления во всех патрубках насосов должны быть равны. Это следует из максимума решения (3), а также из (8) при $P_{i-1} = P_i = P_{i+1}$ и $l_{i-1} = l_i$. Чем больше структура системы отличается от периодической, тем больше отличий в величинах газовой нагрузки на насосы и давления в их патрубках. В случае вакуумной системы У-70 среднее отличие по длине между камерами насосов составляет величину $\pm 23\%$. Для указанных выше двух участков среднее отличие от средней длины около 30%, что приводит к средней разнице давлений $\pm 12\%$. Необходимо определить точки максимумов давления на участках $i-1$, i и поток газовой выделения с отрезка камеры между этими точками, так как именно он должен откачиваться i -м насосом. Для нахождения точек с максимальными давлениями возьмем производные решения (3) по x для обоих промежутков, приравняем их к нулю и определим $(x_{i-1})_M$ и $(x_i)_M$. Тогда длину отрезка камеры, откачиваемого i -м насосом, можно представить в следующем виде:

$$(x_i)_M - (x_{i-1})_M = \frac{1}{2}(l_{i-1} + l_i) + \frac{u_0}{q} \left[\frac{1}{l_i}(P_{i+1} - P_i) - \frac{1}{l_{i-1}}(P_i - P_{i-1}) \right], \quad (9)$$

из которого видно, что это расстояние после умножения на поток газовой выделения q превращается в (8), то есть в поток, откачиваемый i -м насосом. Это подтверждает правильность полученных решений. Участок, приходящийся на i -й насос, отличается от отрезка между серединами соседних камер на величину второго члена суммы в (9). Для всех камер, указанных выше, он составляет, в среднем, 8% от первого, то есть малую долю.

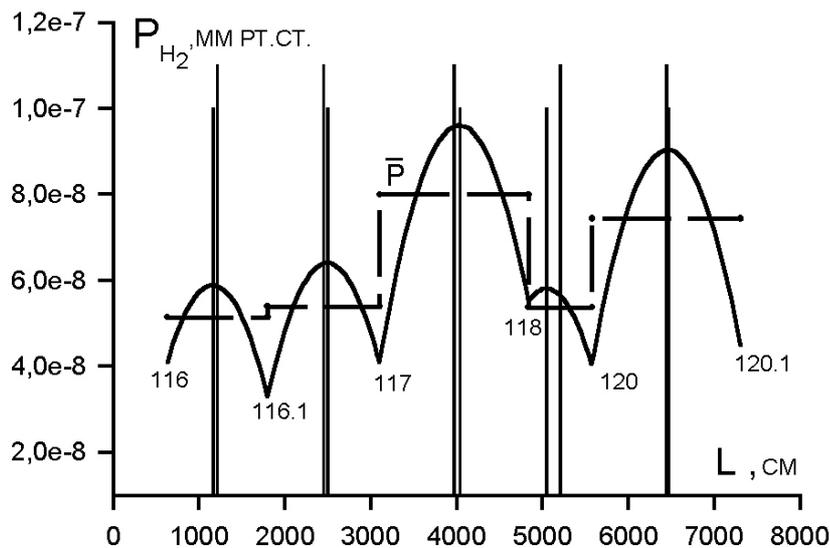


Рис. 2 А.

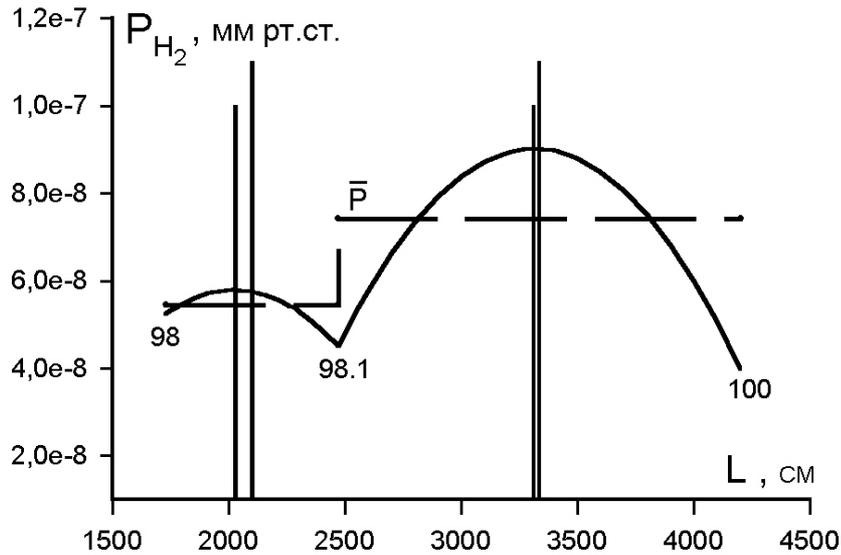


Рис. 2 В.

Рис. 2 А, В. Изменение давления водорода вдоль длины участков камеры. А – камеры 116 ÷ 120.1; В – камеры 98 ÷ 100. Длинные линии проведены через середины камер, короткими отмечены максимумы давления, пунктирная линия показывает среднее давление.

Графической иллюстрацией этого являются рис. 2 А и В, на которых представлен график изменения давления по длине исследуемых участков, построенный согласно решению (3). Длинной линией отмечена середина каждой камеры, а более короткой – координата максимального давления. Среднее отличие между ними находится в пределах $\pm 12\%$. Эти данные указывают на то, что можно с точностью $\sim 10\%$ считать, что нагрузка газовыделения на каждый насос равна потоку газовыделения между серединами соседних участков. Исходя из значений q и S подсчитаны давления для камер всех насосов и кольцевой камеры в целом. Из них следует, что давление водорода составляет, в среднем, 5–10% от давления воздуха в камере, хотя для некоторых высокогерметичных камер доля водорода может составлять 50% и выше. Среднее давление водорода в i -й камере определяется как

$$\bar{P}_i = \frac{1}{l_i} \int_{x_i}^{x_{i+1}} P(x)_i dx = \frac{P_i + P_{i+1}}{2} + \frac{ql_i^2}{12u_0}. \quad (10)$$

На рис. 2 А, В среднее давление показано пунктиром. Согласно оценке по (10) среднее давление на 40–45% превышает среднее арифметическое значение между давлениями в насосных патрубках участков. В целом для кольцевой камеры среднее давление водорода составляет величину $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. Точность всех описанных измерений находится в пределах точности определения давления по току насосов и указана ниже.

Зная поток водорода в каждый насос и быстроту действия насоса по водороду, можно определить давление водорода в патрубке каждого насоса, а по соотношениям из [1,5] и соответствующий водороду ток каждого насоса I_{H_2} . Так как предполагается, что остаточный газ камеры состоит из двух компонентов – водорода и воздуха, то общий разрядный ток каждого насоса равен сумме токов по обоим компонентам $I = I_{H_2} + I_{возд}$. Отсюда, определив величину тока воздуха, можно получить значение давления воздуха (азота) в патрубке каждого насоса и вычислить среднее значение давления в патрубках насосов.

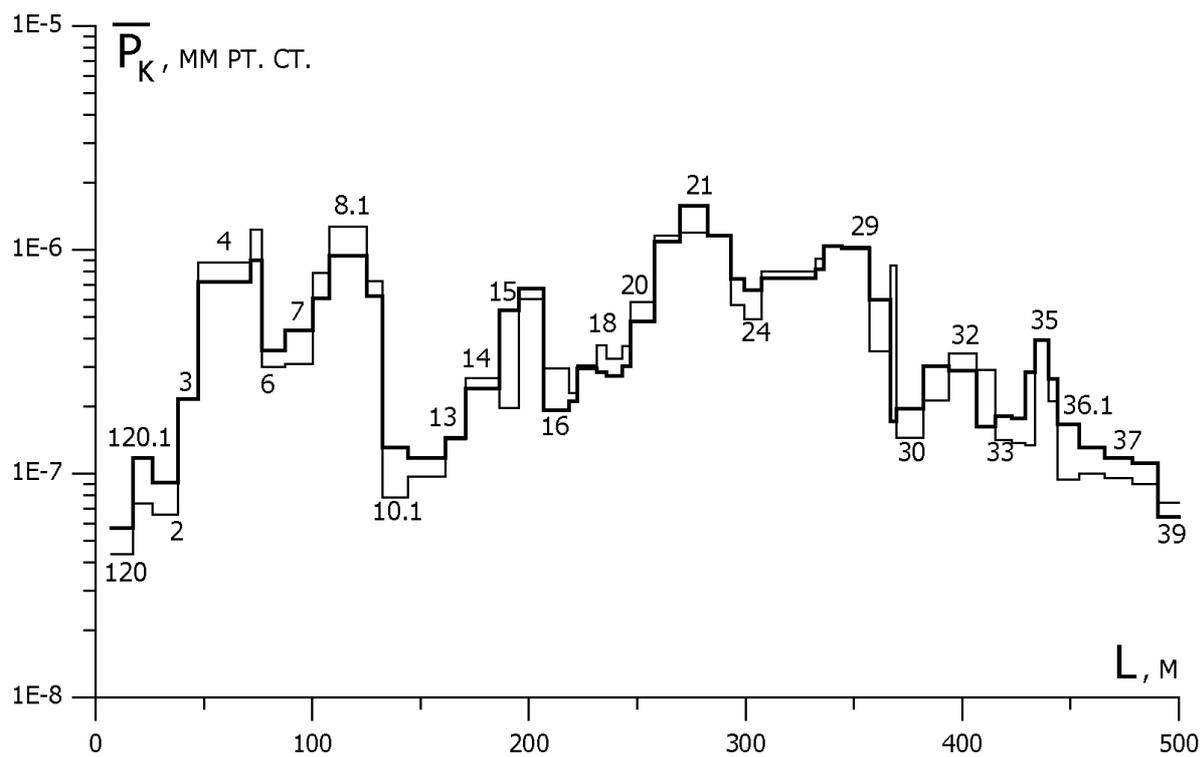


Рис. 3 А.

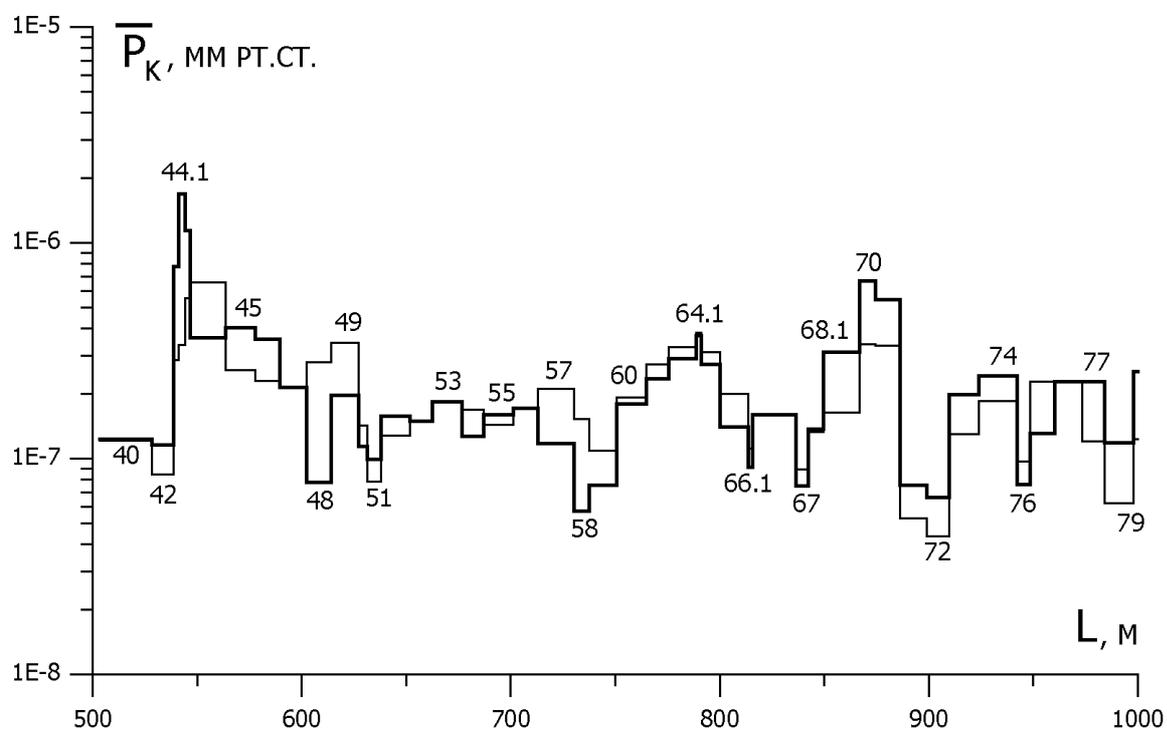


Рис. 3 В.

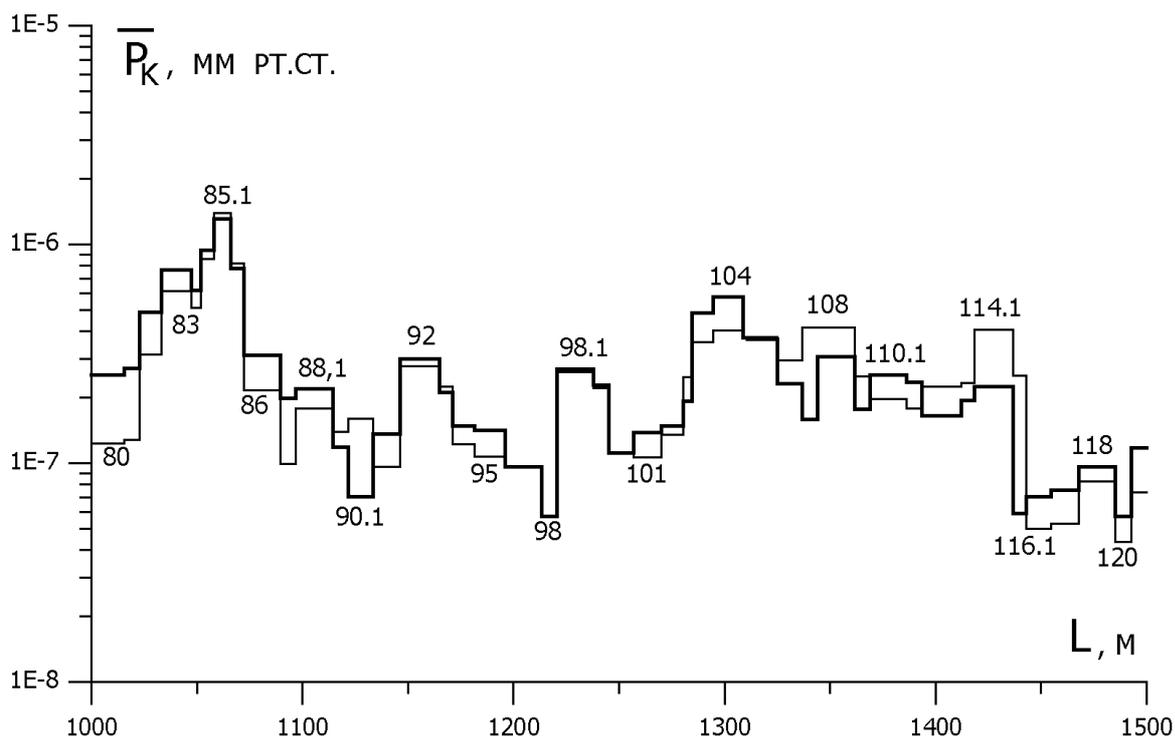


Рис. 3 С.

Рис. 3 А, В, С. Изменение среднего давления в патрубках насосов по длине вакуумной камеры в 2001 – 2002 гг. Тонкая линия соответствует зимнему сеансу 2001 – 2002 гг., а толстая – весеннему 2002 г. сеансу работы ускорителя.

Такой расчет был проведен для всех участков кольцевой камеры У-70. Распределение среднего давления в зимнем 2001-2002 годов и весеннем 2002 года сеансах работы ускорителя показано на рис. 3 А, В и С. Среднее давление в патрубках в целом по кольцу в этих сеансах составляло соответственно $5,7 \cdot 10^{-7}$ и $4,8 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. в отсутствие протонного пучка. Эти цифры дают оценку порядка величины среднего давления в кольцевой камере, но, возможно, ее занижают, так как течи могут находиться не только в патрубках, но и в камерах внутри магнитов. Исследование этого случая и уточнение значения среднего давления проведено в последующих работах.

Для выяснения влияния соотношения компонентов остаточного газа на величину измеряемого в камере давления проведен расчет среднего давления на опытном участке длиной около 120 м между осями 71 и 80 при разных соотношениях водорода и воздуха в остаточном газе. Общее среднее давление определялось как сумма средних давлений по водороду и воздуху. Другие возможные компоненты можно отнести к одному из этих двух в соответствии с двумя механизмами откачки: ионизацией, как у азота, или хемосорбцией, как у водорода. Рассматривалось соотношение компонентов остаточного газа в камере у патрубков соответствующих насосов, где давление определяется по разрядному току насосов. На других участках камеры, например в центре отклоняющих магнитов, процентный состав остаточного газа может быть несколько другим из-за разной проводимости камеры по разным газам и отличия в источниках газовой нагрузки компонентов. Результаты расчета представлены на рис. 4 и 5. На рис. 4 показана зависимость среднего давления от соотношения компонентов для 7 из 13 камер указанного участка кольца. Как видно, общее среднее давление линейно возрастает с ростом содержания массы 2 от чистого азота к чистому водороду. При равном содержании компонентов по 50% отклонение давления от случая чистых газов наименьшее и составляет $\pm 23\%$.

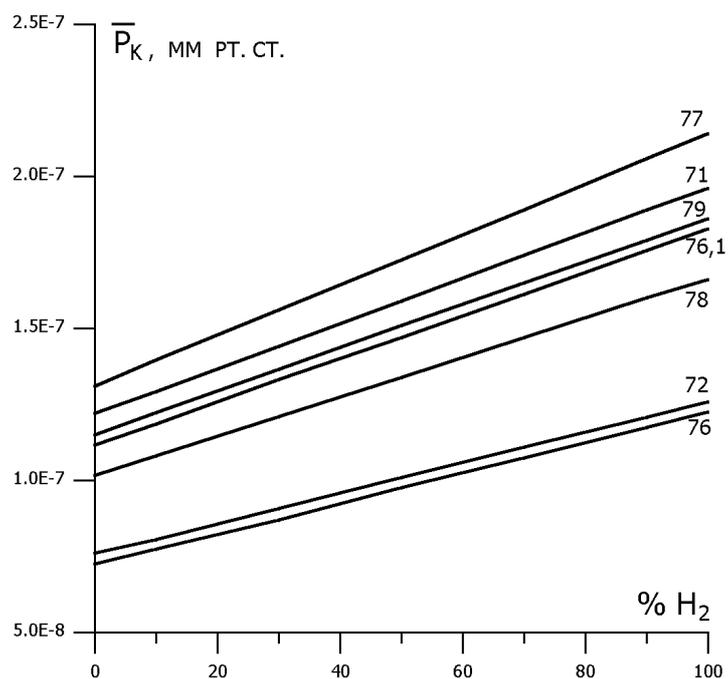


Рис. 4. Зависимость среднего давления опытного участка от процентного содержания водорода в камерах. Цифрами обозначены номера насосов.

На рис. 5 показано изменение среднего давления чистых газов и смеси по длине опытного участка между насосами 71 – 80. Видно, что разница между случаем равных долей азота и водорода и случаями чистых газов невелика.

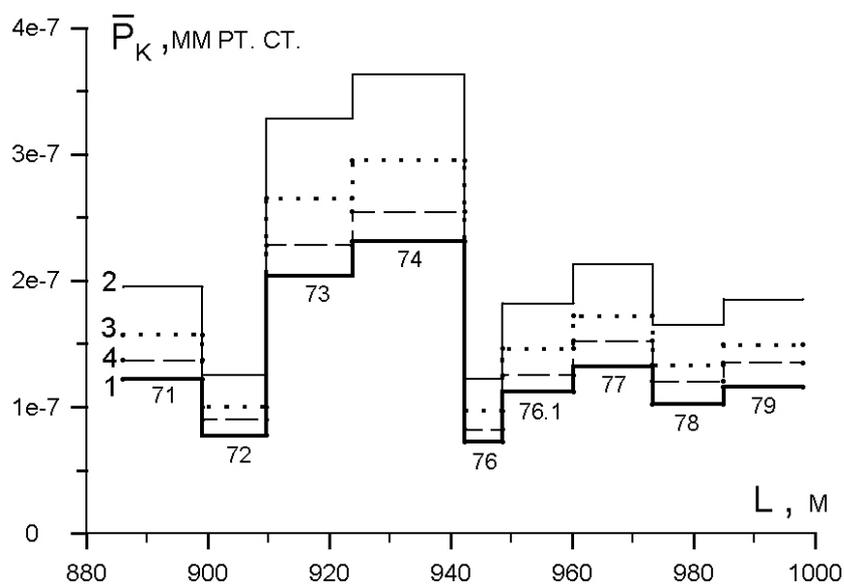


Рис. 5. Распределение среднего давления по длине опытного участка камеры при разном составе остаточного газа: 1 – 100% N_2 ; 2 – 100% H_2 ; 3 – 50% N_2 + 50% H_2 ; 4 – реальное соотношение обоих газов. Цифрами указаны номера насосов.

Из этих результатов следует, что среднее давление несильно зависит от доли водорода в камере. Даже если считать, что парциальные давления водорода и воздуха одинаковы, то отличие от реального случая одной десятой доли водорода составляет для среднего давления не более 20%. Поэтому основным фактором, определяющим среднее давление в вакуумной камере У-70, является натекающий извне атмосферный воздух.

В заключение следует оценить точность измерения давления изложенными методами. Как было показано в [1], точность градуировки давления по току насоса НМД-0,4 в определенных условиях достаточно высока. Так в диапазоне давлений $2 \cdot 10^{-8} \div 7 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. отличие отношения потока откачиваемых атомов к току от табличного значения для воздуха не превышает $\pm 10\%$, что можно считать точностью построения кривых на графиках рисунков в настоящей работе. Выше указывалось, что возможное загрязнение камеры при разложении паров органических веществ может привести к завышению измеряемого давления по сравнению с реальным на 5–6%. Незнание реального соотношения для смеси газов может, как было показано, привести к неточности 19–23%. Тогда суммарная погрешность измерения давления в камере по току насосов в указанном диапазоне находится в пределах $\pm 35 \div 40\%$, что является вполне приемлемой величиной и не превышает погрешности магнитоизрядных манометрических преобразователей промышленного изготовления.

Таким образом, разработанная методика позволяет достаточно надежно оценить поток газовой выделения и относительно просто измерять давление в вакуумной камере синхротрона У-70 по токам изряда насосов НМД-0,4 без учета состава остаточного газа и с достаточной для практических целей точностью. Для более полного использования возможностей этой методики желательно провести разработку и внедрение автоматической системы измерения изрядных токов магнитоизрядных насосов, а также программы для вычисления среднего давления на участках и в целом по кольцу с отображением этой информации на экране монитора в любой нужный момент времени.

Авторы выражают благодарность П.Н. Чиркову за полезное обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, К.Г. Мирзоев. Исследование некоторых параметров магнитоизрядных насосов вакуумной системы У-70. Препринт ИФВЭ 2001-21, Протвино, 2001.
- [2] М.И. Басалаев, С.А. Ильевский, К.Г. Мирзоев, В.Г. Рогозинский. Получение высокого вакуума в резонаторах линейного ускорителя И-100 – инжектора протонного синхротрона на энергию 70 ГэВ. Препринт ИФВЭ 1971-7, Серпухов, 1971.
- [3] Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [4] С. Дэшман. Научные основы вакуумной техники. – М.: Мир, 1964.
- [5] В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев. Измерение давления в вакуумной камере синхротрона У-70 по токам изряда магнитоизрядных насосов, откачивающих камеру. XIX Совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 2004.
- [6] В.Г. Рогозинский, В.Л. Ушков. Распределение давления и метод расчета среднего давления в протяженных вакуумных камерах ускорителей. Препринт ИФВЭ 1974-110, Серпухов, 1974.
- [7] Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении. Под ред. Г.Л. Саксаганского. М.: Атомиздат, 1976.

Рукопись поступила 25 июня 2009 г.

А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев
Оценка потока газовыделения и других параметров вакуумной камеры У-70.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати 25.06.2009. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.
Печ. л. 1,625. Уч.- изд. л. 1,3. Тираж 80. Заказ 39. Индекс 3649.

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

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2009-10, ИФВЭ, 2009
