



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2013–5

ОУК

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

**Оценка коэффициента ионностимулированной
десорбции в вакуумной камере
протонного синхротрона У-70**

Направлено в *ЖТФ*

Протвино 2013

Аннотация

Кивер А.М., Лапыгин В.Г., Ларионов А.В., Мирзоев К.Г. Оценка коэффициента ионностимулированной десорбции в вакуумной камере протонного синхротрона У-70: Препринт ИФВЭ 2013-5. – Протвино, 2013, 16 с., 3 рис., библиогр.: 10.

Разработана методика измерения величины реального и критического коэффициентов ионностимулированной десорбции водорода и азота в камере синхротрона У-70. Дана оценка возможной роли аргона в процессе десорбции. 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 Coefficient of the Ion Stimulated Desorption in Proton Synchrotron U-70 Vacuum Chamber: IHEP Preprint 2013-5. – Protvino, 2013, p. 16, figs. 3, refs: 10.

The method of measuring the real and critical coefficients of ion stimulated desorption of hydrogen and nitrogen in the vacuum chamber of synchrotron U-70 has been developed. The possible role of argon during desorption is evaluated. The results are confirmed by the solutions of equations, and by graphs constructed according to the experimental values of the sputter-ion pumps discharge currents.

1. Введение

Ионностимулированная десорбция является одним из процессов взаимодействия протонного пучка с остаточным газом при движении протонов по орбите в камере ускорителя. К таким явлениям относятся также потери протонов за счет многократного рассеяния на остаточном газе и ядерного рассеяния на большие углы, определяющие, в основном, требования к вакууму в камерах ускорителей.

Роль ионностимулированной десорбции (в дальнейшем ИСД) возрастает при увеличении интенсивности протонного пучка и увеличении времени накопления протонов на столе в процессе инжекции или на выходе. Взаимодействие пучка с остаточным газом и со стенками вакуумной камеры при ИСД заключается в ионизации молекул газа протонами пучка. Образующиеся ионы ускоряются электростатическим полем пучка, зависящим от плотности протонов в сгустке и отношения размеров пучка к размерам камеры, и бомбардируют стенки камеры. При интенсивности пучка $10^{12} - 10^{13}$ протонов за цикл, энергия ионов может составлять десятки электронвольт. В результате бомбардировки со стенок и из приповерхностных областей камеры выделяется газ, находящийся в адсорбированном состоянии и образующийся за счет диффузии из глубины стенок и соударений с молекулами остаточного газа. При этом растет давление, что еще более увеличивает эффект ИСД и может привести к неустойчивости давления в камере.

Таким образом, могут возникнуть условия, при которых процесс роста давления носит лавинообразный и неуправляемый характер – «бампы» давления. Это явление наблюдалось в накопительных кольцах ЦЕРН [1], из-за чего не удавалось получить требуемую величину накопленного тока в течение довольно длительного времени. Поэтому оценка реального коэффициента ИСД в камере У-70 при ускорении и накоплении протонов, являющаяся целью настоящей работы, представляет определенный интерес.

Повышение давления в камере ускорителя может происходить не только вследствие ИСД, но также из-за того, что при торможении электронов и ионов на электродах возникают рентгеновские лучи, которые вызывают эмиссию фотоэлектронов со стенок камеры. Энергия их достигает 100 эВ и они могут вызвать распад химических соединений и десорбцию газа со стенок. Однако, вследствие того, что материалом стенок является нержавеющая сталь, на ней образуется защитная пленка окиси хрома, что делает этот эффект значительно меньше, чем ИСД.

Коэффициентом ИСД называется число десорбированных частиц η , приходящихся на один достигающий стенки ион. Коэффициент ИСД измеряется по разности давлений в камере с пучком и без пучка. После повышения давления в процессе прохождения пучка дальнейшего заметного изменения давления в камере не происходит. Поэтому можно считать, что устанавливается стационарное состояние, давление не зависит от времени, а измеряемый коэффициент ИСД является средним коэффициентом при ускорении и накоплении протонов, их средней энергии и частоте следования импульсов инжекции. Пары воды хорошо откачиваются магниторазрядными насосами камеры синхротрона и в конце сеанса работы ускорителя их давление меньше, чем других основных компонентов. Поэтому можно считать, что остаточный газ в камере состоит, в основном, из водорода и азота, являющегося главной составляющей воздуха и поступающего в камеру через неконтролируемые атмосферные течи [2,3]. Водород и окись углерода СО, массовое число которой также как у азота 28, поступают на стенки за счет диффузии из глубинных слоев, причем диффузия водорода преобладает. Кислород также образует на поверхности химические соединения, его вклад в десорбцию подобен азоту и поэтому он немного увеличивает коэффициент ИСД азота. Можно считать, что соотношение компонентов, адсорбированных на поверхности, соответст-

вует их процентному содержанию в остаточном газе камеры, так как этот слой поддерживается в равновесном состоянии за счет соударений с молекулами остаточного газа. Очевидно, что таково же отношение вероятностей десорбции этих газов бомбардирующими стенку ионами, а значит и отношение приращений давления компонентов остаточного газа. В настоящей работе давление измерялось по току насосов НМД-0,4 [4,9]. Измеряя приращение тока разряда насоса при подаче пучка и зная градуировку давления по току каждого компонента, можно определить приращения и величину давлений водорода и азота в камере при работе с протонным пучком в месте присоединения данного насоса. В настоящее время содержание водорода в остаточном газе камеры У-70 в отсутствие пучка в конце сеанса работы ускорителя составляет, в среднем, 14 % от общего давления. Следует отметить, что несколько лет назад водород составлял 11%, но в результате проведенной работы по улучшению герметичности камеры, воздуха стало меньше, и среднее давление без пучка составляет в настоящее время $5 \cdot 10^{-7}$ против $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. в 2006 году.

Все упомянутые газы находятся на поверхности камеры в хемосорбированном состоянии с энергией связи 30 - 40 ккал/моль [5]. Поэтому энергии иона достаточно, чтобы десорбировать несколько десятков молекул. Адсорбированные на поверхности камеры частицы располагаются в термодинамически наиболее устойчивых местах, где их потенциальная энергия минимальна – в центрах адсорбции. Энергия образования этих центров, равная энергии выбивания из них адсорбированных частиц, составляет около 1 эВ [6]. Отсюда также следует, что один ион энергетически в состоянии десорбировать десятки частиц. Как показано ниже, коэффициент ИСД в камере У-70 по порядку величины составляет как раз несколько десятков молекул на ион.

2. Методика расчета и оценка коэффициента ИСД для протонного пучка на У-70

Для изучения ИСД необходимо знание эффективной скорости ионизации протонами остаточного газа камеры, которая зависит от энергии протонов. Согласно [7,8] эта величина при энергии 76 ГэВ составляет в пересчете на давление 1 мм рт. ст. (1 тор) $\chi = 1.34 \cdot 10^9$ ион/прот. · тор · с. При N циркулирующих протонах и коэффициенте ИСД η мол/ион скорость десорбции, с учетом того, что бомбардирующий ион захватывается

стенкой камеры, составляет $\chi N(\eta - 1)$ мол/тор·с. Так как в 1 см^3 объема камеры при давлении 1 тор и комнатной температуре содержится $\alpha = 3.25 \cdot 10^{16}$ мол/см³·тор, то на 1 см длины камеры при длине орбиты L см за счет ИСД выделяется в 1 секунду следующий объем газа:

$$\sigma = \frac{\chi N(\eta - 1)}{\alpha L} \text{ см}^3/\text{с} \cdot \text{см}. \quad (1)$$

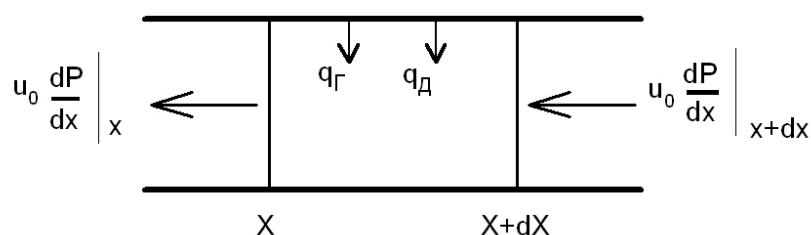


Рис. 1. Схема изменения потока газа в элементе длины камеры.

На рис. 1 схематически показано, как меняется газовый баланс в элементе камеры длиной dx в стационарном режиме, когда поток не зависит от времени. Стрелки указывают движение откачиваемого газа по направлению к насосу. Изменение потока в элементе dx камеры можно выразить с помощью следующего уравнения:

$$u_0 \frac{dP}{dx} \Big|_{x+dx} - u_0 \frac{dP}{dx} \Big|_x = -q_{\Gamma} dx - q_{\Delta} dx, \quad (2)$$

где u_0 - удельная пропускная способность камеры по данному газу, а q_{Γ} и q_{Δ} - поток газовыделения и поток ИСД с 1 см длины камеры.

Рассмотрим участок камеры длиной l , середина которого является началом координатной оси x , а на концах в точках $-l/2$ и $+l/2$ (рис. 2) находятся центры присоединительных патрубков однотипных магниторазрядных насосов с одинаковой эффективной быстротой действия в этом сечении. Будем считать, что P - давление в камере при наличии пучка протонов, а давление без пучка отметим индексом ноль P_0 . Рассмотрение уравнений, описывающих зависимость давления от x , начнем с водорода. Уравнение для изменения давления водорода по длине камеры имеет следующий вид:

$$\frac{d^2P}{dx^2} + \lambda^2 P + \frac{q_\Gamma}{u_0} = 0, \quad (3)$$

где $\lambda^2 = \sigma/u_0$ введено в квадрате для сохранения размерности. Граничные условия для (3):

$$x = -l/2, \quad P = P_1; \quad x = +l/2, \quad P = P_2. \quad (4)$$

Общее решение уравнения (3) удобно искать в следующем виде:

$$P = A \sin \lambda x + B \cos \lambda x - q_\Gamma / u_0 \lambda^2. \quad (5)$$

Нахождение коэффициентов A и B подстановкой в (5) условий (4) дает решение в виде:

$$P = \frac{P_2 - P_1}{2 \sin(\lambda l/2)} \sin \lambda x + \frac{P_1 + P_2 + 2q_\Gamma / u_0 \lambda^2}{2 \cos(\lambda l/2)} \cos \lambda x - q_\Gamma / u_0 \lambda^2. \quad (6)$$

Из полученного решения можно определить λ и σ , а также коэффициент ИСД η , используя соотношение (1). Это можно сделать, например, следующим образом. Потoki газа в местах расположения патрубков насосов равны произведению производной по x решения (6) на пропускную способность u_0 , а также определенной части откачиваемого насосом потока, равного произведению быстроты действия насоса на давление в его присоединительном патрубке. Поэтому для точек $-l/2$ и $+l/2$ можно записать следующие соотношения:

$$x = -l/2: \quad u_0 \frac{dP}{dx} = SP_1 M_1; \quad x = +l/2: \quad -u_0 \frac{dP}{dx} = SP_2 M_2, \quad (7)$$

где M_1 - часть откачиваемого насосом потока SP_1 , которая поступает в насос справа, из рассматриваемого i промежутка l_i , M_2 - соответственно часть потока SP_2 , идущая слева в другой насос, установленный на конце промежутка, а S - эффективная быстрота действия по данному газу в присоединительных патрубках камеры, принятая одинаковой для всех насосов в рассматриваемом диапазоне давлений. Как показано в [2], при откачке водорода нагрузка на каждый насос в отсутствие пучка близка по величине к потоку газовой выделения участка между серединами камер справа и слева от этого насоса. Так как ИСД увеличивает газовую нагрузку пропорционально давлению и длине участка, то отношения потоков с обеих сторон насосов остаются такими же, как без пучка, и указанные доли равны соответственно $M_1 = l_i / (l_{i-1} + l_i)$ и $M_2 = l_i / (l_i + l_{i+1})$. Будем

считать, что $P_1 = P_i$ и $P_2 = P_{i+1}$. Знак минус во втором соотношении (7) указывает на то, что здесь приращения давления и координаты противоположны по знаку. Из (6) и (7) можно найти неизвестную величину λ .

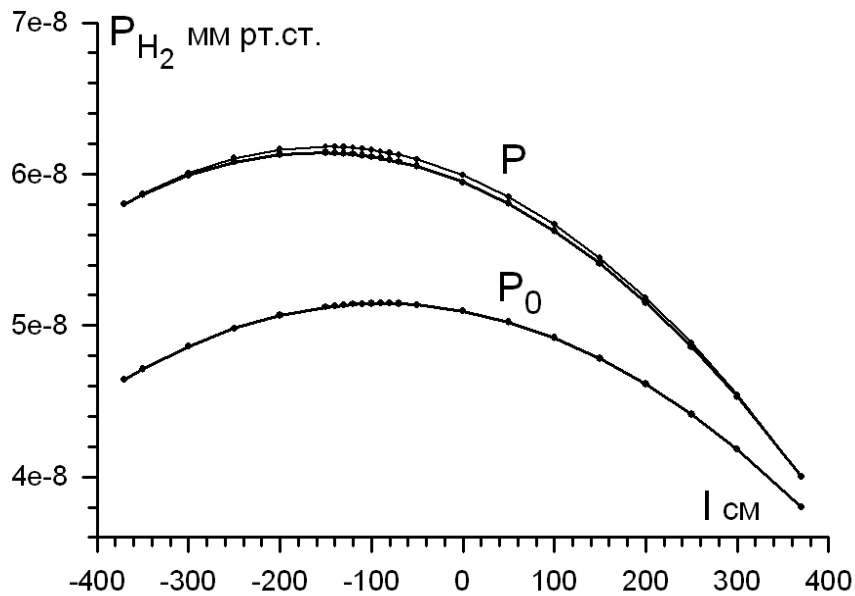


Рис. 2. Изменение давления водорода по длине камеры с номером 70.

Другим способом определения значения λ является нахождение потока газа, образующегося при ИСД, как произведения объема σ на длину промежутка и на среднее давление в нем в присутствии протонного пучка. Этот поток равен разности потоков с пучком и без пучка, откачиваемых из рассматриваемого промежутка насосами на обоих его концах:

$$\sigma \bar{P} l = S[(P_1 - P_{01})M_1 + (P_2 - P_{02})M_2], \quad (8)$$

где P_{01} и P_{02} - давления в патрубках насосов без пучка, а \bar{P} - вычисляется интегрированием решения (6) от $-l/2$ до $+l/2$ и делением на длину промежутка. Из (8) можно найти σ, λ , а значит и η , используя вычислительную компьютерную систему MathCad. Значения коэффициентов ИСД, полученные двумя указанными выше способами из (1), отличаются между собой примерно на 15%, что подтверждает их применимость. Среднее от этих значений при средней интенсивности протонного пучка $N = 2.7 \cdot 10^{12}$ во время измерений, проведенных в весеннем 2011 года сеансе работы

ускорителя, дает величину коэффициента ИСД по водороду $\eta_{H_2} = 75$. Произведение $\sigma\bar{P} = q_D$ является потоком газа, десорбирующегося на 1 см длины камеры в 1 секунду, и представляет собой, таким образом, аналог потока q_T для ИСД.

На рис. 2 приведен график изменения давления водорода с пучком и без пучка по длине камеры номер 70. Кривые для P , построенные по величинам λ , определенным двумя способами, практически идентичны. Это подтверждает возможность вычисления коэффициента ИСД с помощью среднего давления \bar{P} и может быть использовано для определения коэффициента ИСД по азоту, к рассмотрению которого мы сейчас переходим. Далее под P будем подразумевать давление азота, за исключением специально оговоренных случаев. Можно предположить, что максимум давления азота в каждой i камере, как с пучком, так и в его отсутствие, приходится на места расположения воздушных течей, известных по предыдущим работам [3,9] как точки a_i . Это существенно упрощает разработку методики измерения коэффициента ИСД для азота, так как нахождение общего решения уравнения, подобного (3), представляет определенные трудности. Уравнение, описывающее изменение давления азота по длине камеры, имеет следующий вид:

$$u_0 \frac{d^2 P}{dx^2} = -Q\delta(x-a) - q_D, \quad (9)$$

где $\delta(x-a)$ - импульсная δ -функция Дирака, q_D - поток десорбированных молекул азота, приходящийся на единицу длины камеры, а Q - поток, натекающий в камеру через течь в точке a . Места течей и значения потоков через них для всех камер У-70 определены в [9]. Граничные условия для уравнения (9) следующие:

$$x = -l/2, \quad P = P_1; \quad x = l/2, \quad P = P_2, \quad (10)$$

где P_1 и P_2 - давления на концах рассматриваемой камеры. Решение (9) имеет вид:

$$P(x) = -\frac{Q}{2u_0}|x-a| + \frac{q_D}{2u_0} \left(\frac{l^2}{4} - x^2 \right) + \frac{x}{l} \left(P_2 - P_1 - \frac{Qa}{u_0} \right) + \frac{Ql}{4u_0} + \frac{P_1 + P_2}{2}. \quad (11)$$

Поток ИСД для азота можно определить аналогично водороду, приравняв идущий к насосам поток к произведению удельной проводимости камеры на производную решения (11) по координате в центрах патрубков насосов на обоих концах камеры:

$$x = -l/2 : \quad u_0 \frac{dP}{dx} = SP_1 K_1; \quad x = l/2 : \quad -u_0 \frac{dP}{dx} = SP_2 K_2, \quad (12)$$

где K_1 и K_2 - коэффициенты для азота, аналогичные M_1 и M_2 для водорода и показывают долю потока, которую насосы откачивают из данной камеры. Как показано в [3], каждый насос откачивает сумму половин потоков течей Q из камер слева и справа от этого насоса. При ИСД поток десорбции в камере растет пропорционально давлению или газовой нагрузке, поэтому отношение потоков справа или слева ко всему потоку, откачиваемому насосом, такое же, как без пучка. Тогда для i камеры $K_1 = Q_i / (Q_{i-1} + Q_i)$ и $K_2 = Q_i / (Q_i + Q_{i+1})$. Так как потоки течей в некоторых камерах могли измениться по сравнению со значениями, указанными в [9], то можно определить поток Q_i в данной камере, используя методику [9], по формуле:

$$Qa = u_0 (P_{02} - P_{01}), \quad (13)$$

где P_{01} и P_{02} - давление азота в патрубках насосов до подачи протонного пучка. Таким образом, значения всех величин будут известны и из (12) можно определить поток $Q_{ИСД}$. Тот же поток $Q_{ИСД} = q_d l$ равен потоку, откачиваемому обоими насосами из данного i промежутка:

$$Q_{ИСД} = S[(P_1 - P_{01})K_1 + (P_2 - P_{02})K_2], \quad (14)$$

аналогичному (8) в случае водорода. Значения q_d , полученные из (12) и (14), отличаются друг от друга на 10 - 15% , что косвенно подтверждает полученные величины. Как показано выше, поток десорбированного газа равен произведению среднего давления в промежутке на его длину и на объем газа, образующегося в 1 секунду на 1 см длины камеры. Проинтегрировав решение (11) от $-l/2$ до $+l/2$ и разделив на l , из среднего значения q_d находим σ для азота.

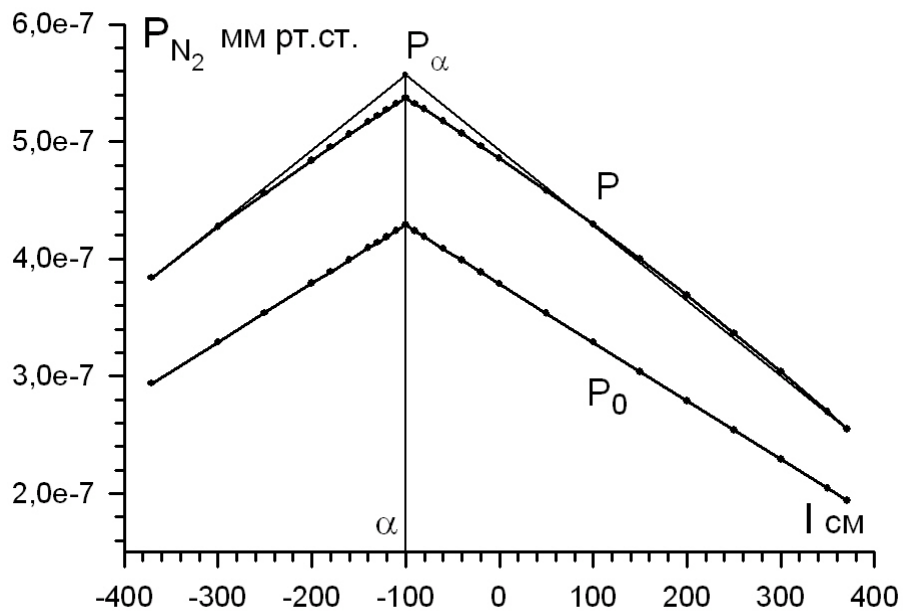


Рис. 3. График изменения давления азота в камере номер 70.

На рис. 3 приведены графики изменения давления азота по длине камеры 70 с пучком и без пучка. Видно, что без пучка давление меняется по прямой линии, как и в [3], а с пучком прямолинейность искажается вследствие ИСД. Это нарушение незначительно и можно, как показано на рисунке, построить прямые линии. Для этого по методике, описанной в [3], найдем давление в месте течи P_a по следующей формуле:

$$P_a = [P_2(a + l/2) + P_1(a - l/2)]/2a. \quad (15)$$

Поток ИСД можно вычислить, определив среднее давление по разности давлений в месте течи и на концах камеры с учетом расположения места течи. Значение η , найденное таким образом, отличается от определенного выше по решению (11) примерно на 5 %. Это подтверждает применимость прямолинейной зависимости для азота и хорошо видно на графике рисунка 3. Определив разными методами среднее σ , найдем из (1) коэффициент ИСД азота $\eta_{N_2} = 46$. Методика определения коэффициентов ИСД отработывалась на камере с номером 70 и проверялась на девяти других камерах, находящихся в разных участках кольца ускорителя. Таким образом, полученные значения η являются средними результатами измерений на десяти камерах.

В адсорбированных на поверхности камеры газах водорода меньше, чем азота из-за его более низкого давления в объеме, однако поток бомбардирующих стенку ионов водорода может составлять примерно 0.6 потока ионов азота ввиду того, что при равной энергии более легкие ионы водорода имеют большую скорость. Поэтому вклады ионов водорода и азота в процессы на поверхности камеры, примерно, равнозначны, тем более что водород может десорбироваться и ионами азота, как, впрочем, и наоборот. Кроме того, проводимость камеры и быстрота действия насосов по водороду больше, чем по азоту. Корректный учет всех этих факторов представляет значительные трудности, особенно ввиду наличия диффузии водорода из глубины стенок. В этих условиях можно предположить, что интенсивность обмена водорода на поверхности несколько выше, десорбция сильнее отражается на его более низком давлении и равновесие устанавливается при более высоком значении коэффициента ИСД, чем у азота. Это, в какой-то мере, объясняет разницу в значениях коэффициентов ИСД обоих газов.

Общий эффективный коэффициент ИСД остаточного газа в кольцевой камере можно определить из коэффициентов компонентов с учетом их парциальных давлений, или статистического веса каждого компонента в общем давлении в камере:

$$\eta = \frac{\eta_{H_2} P_{H_2} + \eta_{N_2} P_{N_2}}{P_{H_2} + P_{N_2}} \approx 50. \quad (16)$$

Полученные значения коэффициентов ИСД интересно сравнить с результатами более ранних работ, в которых ионностимулированная десорбция рассматривалась в связи с разработкой в ИФВЭ проекта ускорительно-накопительного комплекса (УНК) на энергию 3 ТэВ. [7,8,10]. В стационарной части решения уравнения, подобного (5), после ряда преобразований было получено следующее приближенное выражение для коэффициента ИСД [10]:

$$\eta = \frac{(P - P_0) \alpha L}{\chi N \langle l [P(Sl + 8u_0) - q_T l] / 8Su_0 \rangle}, \quad (17)$$

где P и P_0 - установившееся давление основного компонента остаточного газа – азота с пучком и без пучка соответственно в точке камеры с координатой $x = l/2$, а q_T - поток течи в месте присоединения насоса к камере, принятый равным $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \cdot \text{тор/с}$. Используя параметры современной камеры У-70 при измеренных давлениях для

промежутка с номером 70 и средней интенсивности протонного пучка $2.7 \cdot 10^{12}$, можно получить из (17) величину коэффициента ИСД по азоту, равную 47,5, что почти совпадает со средним значением, определенным в настоящей работе, и является косвенным подтверждением полученных результатов. Измерения коэффициентов ИСД проводились при разных значениях интенсивности пучка протонов в диапазоне от $1.5 \cdot 10^{12}$ до $4 \cdot 10^{12}$ протонов за цикл.

3. Оценка коэффициента ИСД для пучка ионов углерода в камере У-70

В указанном выше сеансе работы ускорителя 2011 года наряду с протонами проводились эксперименты с пучком легких ионов и был ускорен пучок шестизарядных ядер углерода ${}_{12}\text{C}^{6+}$ с интенсивностью $(1-4) \cdot 10^9$ ионов/цикл. В связи с этим в настоящей работе сделана попытка оценки коэффициента ИСД для ионов углерода. Порядок величины объема десорбированного газа σ в случае углерода примерно такой же, как и для азота при ускорении протонов. Однако, если для протонов известна скорость ионизации остаточного газа камеры χ , что позволяет определить коэффициент ИСД из (1) или (17), то в случае углерода эта величина неизвестна. Ее можно оценить по сравнению с ионизацией протонами следующим образом. Сечения ионизации остаточного газа ионами углерода и протонами должны относиться между собой как квадраты зарядов ионов углерода и протонов. Кроме того, отношение этих сечений должно быть таким же, как отношение энергий пучков углерода и протонов. Исходя из этого, величину скорости ионизации газа камеры ионами углерода можно оценить как $3 \cdot 10^{11}$ ионов/ион пучка \cdot тор \cdot с. Из-за более низкой по сравнению с протонами интенсивности потенциал пучка ионов углерода недостаточен для того, чтобы каждый ион остаточного газа при бомбардировке стенки камеры выбивал одну адсорбированную частицу. Так при интенсивностях протонов 10^{12} и шестизарядных ионов углерода 10^9 за цикл, ток пучка, а значит его потенциал относительно камеры и энергия ионов остаточного газа, в случае углерода должны быть почти в 170 раз меньше, чем в случае протонов. Поэтому для того, чтобы передать стенке камеры энергию порядка 1 эВ, равную, как указывалось выше, средней энергии десорбции одной частицы, в случае углерода требуется, соответственно, 17 бомбардирующих ионов. Однако скорость образования ионов остаточ-

ного газа в случае углерода, согласно приведенной выше оценке, в 200 раз больше, чем у протонов. Поэтому в случае углерода энергетически возможна ИСД с коэффициентом, большим или того же порядка величины как у протонов. Измеренный поток десорбции для пучка углерода в 2 – 3 раза больше, чем для протонов, а вычисленный средний коэффициент ИСД для азота составляет по (17) величину около 120 мол/ион при средней интенсивности пучка углерода. Это значение коэффициента ИСД почти в 2,6 раза превосходит величину η_{N_2} для протонов, приведенную выше. Возможная причина этого состоит в том, что поток десорбции со стенок обусловлен как бомбардировкой ионами остаточного газа, так и потерями многозарядных ионов углеродного пучка, рассеянных на малые углы в процессе ускорения и достигающих стенок камеры.

4. Критический коэффициент ИСД

Определенный практический интерес представляет критический коэффициент ИСД (η_{KP}), после достижения которого нет стационарного решения уравнений и давление начинает экспоненциально возрастать, что соответствует упомянутым выше «бампам» давления. При этом рост давления происходит, главным образом, за счет выделения газов из насосов. В работах [7,8] использовалось следующее выражение для критического коэффициента ИСД:

$$\eta_{KP} = \gamma_1^2 \alpha L u_0 / \chi N, \quad (18)$$

где γ_1 - первый корень трансцендентного уравнения

$$\gamma g(\gamma/2) = S/2u_0. \quad (19)$$

Условием устойчивости работы вакуумной системы является $\eta < \eta_{KP}$. Для параметров вакуумной системы и камеры У-70 критические коэффициенты ИСД на участке 70, определенные из (18)- (19) при $N = 2 \cdot 10^{12}$ для азота и водорода, имеют следующие значения: $\eta_{KP,N_2} \sim 310$ и $\eta_{KP,H_2} \sim 820$. Отсюда следует, что в случае значительного повышения интенсивности пучка протонов вакуумная система ускорителя не имеет достаточного «запаса прочности», особенно по азоту, и может оказаться близкой к критическим условиям. В связи с этим надо осторожнее подходить к увеличению расстояния между двумя соседними насосами, например в случае отключения каких-либо насосов. Так если увеличить это расстояние вдвое, то, как следует из (18) и (19), крити-

ческий коэффициент ИСД для азота станет меньше почти в 3, а для водорода в 2.5 раза. В любом случае не следует допускать расстояний l , больших тех, которые имеют место на камере У-70 в настоящее время, а именно, не более 17 – 18 м.

Приведенные выше значения коэффициентов ИСД измерены на нескольких участках. Возможно, на этих участках условия более благоприятные, чем на некоторых других, на которых имеются случайные локальные загрязнения органикой, что может привести к повышенной концентрации водорода или окиси углерода и к неустойчивости давления. Таковы, например, участки, на которых находятся устройства ввода и вывода, мишени, камеры вывода каналов и другие камеры с повышенной газовой нагрузкой. Также необходимо добиваться улучшения герметичности камеры с целью снижения парциального давления азота. В [7,8] отмечается, что для успешного накопления протонного пучка с интенсивностью $\sim (3 - 5) \cdot 10^{13}$ надо улучшить параметры вакуумной системы и камеры У-70 таким образом, чтобы при этой интенсивности коэффициент ИСД составлял несколько молекул на ион. Согласно результатам настоящей работы при такой интенсивности коэффициент ИСД по азоту должен быть 3 – 4, а по водороду 4 – 7, что соответствует приведенному прогнозу.

5. Влияние аргона на ИСД в камере У-70.

Практические рекомендации и выводы из полученных результатов

В заключение полезно оценить возможное влияние аргона на ИСД в связи с малой быстротой действия насосов по аргону сравнительно с другими компонентами остаточного газа камеры. Как показано в [9], эффективная быстрота действия в патрубках насосов НМД-0,4 по аргону в 12 раз меньше, чем по азоту, вследствие чего критический коэффициент ИСД для аргона, оцененный из (18) - (19), например, для камеры номер 70 и интенсивности пучка протонов $2 \cdot 10^{12}$, может быть достаточно малым $\eta_{кр,Ar} \sim 32$. Для того чтобы ИСД имела место, надо, чтобы каждый бомбардирующий ион выбивал с поверхности более одной адсорбированной частицы. Потенциал ионизации аргона близок к потенциалу ионизации азота, а давление аргона близко к 2% от общего давления в камере [9]. Поэтому число ионов аргона составляет около трех процентов от числа ионизованных молекул азота. Также как ионы других компонентов, ионы аргона освобождают адсорбированные на поверхности газы, увеличивая коэффициент ИСД,

а затем часть их отражается в объем камеры, а часть внедряется в приповерхностные слои стенок, откуда может быть освобождена бомбардировкой ионами азота и водорода. В стационарном случае роста давления аргона не происходит, так как не может освободиться больше атомов аргона, чем поступает ионов, и коэффициент ИСД аргона не растет. Однако некоторая часть внедренных ионов может оставаться и накапливаться в приповерхностных слоях за счет замуравывания распыленными атомами стенки или загрязнений. Источником избыточного количества аргона может также стать аргон, запасенный в стенках камеры в процессе запуска магниторазрядных насосов при подготовке к сеансу работы ускорителя, когда давление в камере в течение нескольких десятков, а то и сотен часов составляет 10^{-5} - 10^{-4} мм рт. ст. Аргон является одним из компонентов остаточного газа камеры и часть его ионизируется за счет выхода разряда из насосов. Кроме того, насосы и определенные участки камеры, могли ранее очищаться ионной аргонной обработкой, во время которой средняя доза аргона 10^{15} ион/см². Какая-то часть из них может остаться внедренной в стенки. Особенно много аргона может находиться в участках камеры, непосредственно прилегающих к патрубкам насосов. Источником аргона могут стать также пробои в магниторазрядных насосах различных участков, в процессе которых в камеру обычно выделяется аргон. Глубина внедрения аргона несколько больше, чем у других компонентов из-за большей энергии ионов во время аргонной обработки или запуска насосов. Однако отдельные ионы азота или водорода, за счет статистического распределения по энергии могут проникнуть глубже других и десорбировать некоторое количество аргона из приповерхностных слоев стенки. Даже если предположить, что только каждый сотый из участвующих в ИСД ионов способен освободить один из замураванных в этих слоях атомов аргона, то может начаться рост η_{Ar} . Причины наличия избыточных атомов аргона могут проявляться эпизодически или иметь регулярный характер в процессе подачи протонного пучка, ускорения, накопления или роста его интенсивности. Возможен также постепенный рост температуры камеры или насосов. Все это может привести к нарушению стационарных условий, вследствие чего парциальное давление аргона при наличии пучка протонов может постепенно возрастать, а коэффициент η_{Ar} стать больше единицы. Как показывает оценка по (17), достаточно увеличения давления аргона на 10 %,

чтобы его коэффициент ИСД превысил приведенную выше величину $\eta_{KP,Ar}$, после чего инициируется лавинообразное возрастание давления аргона в камере. Возможно, что явление, которое обычно принято называть «аргонной нестабильностью» и которое неоднократно наблюдалось на практике во время сеансов работы ускорителя примерно через месяц работы с пучком на некоторых участках кольцевой камеры, обязано своим возникновением именно ИСД по аргону. При этом также могут приблизиться к критическим значениям коэффициенты ИСД по азоту или водороду, так как во время нестабильности выделяются откачанные насосами газы. По крайней мере, этого нельзя полностью исключить. Поэтому, по мере возможности, следует искать и устранять наиболее значительные течи, являющиеся источником проникновения в камеру аргона в составе атмосферного воздуха. Кроме того, в наиболее проблемных участках кольца с тяжелыми вакуумными условиями насосы НМД – 0,4 целесообразно заменить на ПВИГ– 250, которые имеют в несколько раз более высокую быстроту действия по аргону за счет того, что половина катодов в разрядных ячейках выполнена из тантала, который распыляется значительно лучше, чем титан. В [7,8,10], а также в других работах по исследованию ИСД, насколько известно авторам, роль аргона не рассматривалась и этот вопрос не обсуждался.

Подводя итоги, можно отметить, что разработанная методика позволяет достаточно надежно оценить величину реальных и критических коэффициентов ИСД основных составляющих остаточного газа вакуумной камеры ускорителя У-70. Представлены соображения относительно возможной роли аргона в ионностимулированной десорбции в камере и даны некоторые практические рекомендации по уменьшению негативного влияния ИСД на работу вакуумной системы ускорителя. Впервые приведена оценка коэффициента ИСД для пучка ионов углерода. Полученные результаты представляют интерес для вакуумных систем и камер ускорительно-накопительных комплексов.

Авторы выражают благодарность С.В. Иванову и В.И. Гаркуше за поддержку и интерес к данной работе.

Список литературы

- [1] E.Fisher. CERN-ISB-VA/72 – 39, Geneva, 1972.
- [2] А.М. Кивер, В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев. Оценка потока газовыделения и других параметров вакуумной камеры У-70. Препринт ИФВЭ 2009-10, Серпухов, 2009.
- [3] А.М.Кивер, В.Г. Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев. Герметичность вакуумной камеры протонного синхротрона У-70. Препринт ИФВЭ 2009-11, Серпухов, 2009.
- [4] В.Г. Лапыгин, А.В.Ларионов, К.Г.Мирзоев. Измерение давления в вакуумной камере синхротрона У-70 по токам разряда магниторазрядных насосов, откачивающих камеру. Доклад на XIX совещании по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 2004.
- [5] Г. Левин. Основы вакуумной техники. М.: «Энергия». 1969, С.42.
- [6] Н.В. Черепнин. Сорбционные явления в вакуумной технике. М. «Советское радио», 1973. 384 с, С. 357.
- [7] К.Г. Мирзоев, В.Г. Рогозинский, В.Л.Ушков. Методика расчета и некоторые проблемы разработки криогенной вакуумной камеры ускорительно-накопительного комплекса на сверхпроводящих магнитах. Препринт ИФВЭ 1977-119, Серпухов, 1977.
- [8] К.Г. Мирзоев, В.Г. Рогозинский, В.Л. Ушков, А.А. Хабибуллин. Динамика давления при ионностимулированной десорбции газа в вакуумной камере протонного синхротрона. Препринт ИФВЭ 1980-72. Серпухов 1980.
- [9] А.М. Кивер, В.Г.Лапыгин, А.В. Ларионов, К.Г. Мирзоев. Исследование вакуумной камеры протонного синхротрона У-70. Препринт ИФВЭ 2011-1, Серпухов, 2011.
- [10] В.Г. Рогозинский, В.Л. Ушков. Влияние пучка на давление в вакуумной камере протонного синхротрона ИФВЭ. Препринт ИФВЭ, 1977-71, Серпухов, 1977.

Рукопись поступила 11 марта 2013 г.

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

Оценка коэффициента ионностимулированной десорбции в вакуумной камере протонного синхротрона У-70.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 18.03. 2013. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 1, 25. Уч.– изд.л. 1,73. Тираж 80. Заказ 14. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ

142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2013-5, ИФВЭ, 2013
