

Оценка коэффициента ионно-стимулированной десорбции в вакуумной камере протонного синхротрона У-70

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

Государственный научный центр РФ — Институт физики высоких энергий,
142281 Протвино, Россия
email: larionov@ihep.ru

(Поступило в Редакцию 14 мая 2013 г.)

Предложена методика, которая позволяет оценить коэффициент ионно-стимулированной десорбции в вакуумной камере протонного синхротрона У-70 по измерению разницы давлений основных компонентов остаточного газа камеры с пучком и без пучка. Рассмотрены решения уравнений для изменения давлений водорода и азота. Определен порядок величины коэффициента ионно-стимулированной десорбции для пучка ускоренных ионов углерода. Указаны критические значения коэффициентов. Полученные результаты подтверждены разными методами расчета, а также графиками, построенными согласно измерениям токов магниторазрядных насосов. Рассмотрена возможная роль аргона в процессе десорбции.

Введение

Ионно-стимулированная десорбция является одним из процессов взаимодействия протонного пучка с остаточным газом при движении протонов по орбите в камере ускорителя. К таким процессам 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 ионно-стимулированной 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 электрон-вольт. 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 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. Целью настоящей работы является оценка реального коэффициента ИСД в камере синхротрона У-70 при ускорении и накоплении протонов.

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 наблюдается. Поэтому можно считать, что устанавливается стационарное состояние, давление не зависит от времени, а измеряемый коэффициент ИСД является средним коэффициентом при ускорении и накоплении протонов в цикле работы У-70. Пары воды хорошо откачиваются магнитозарядными насосами камеры синхротрона и в конце сеанса работы ускорителя их давление меньше, чем других компонентов остаточного газа. Поэтому можно считать, что в этот период остаточный газ в камере состоит в основном из водорода и азота. Азот является главной составляющей частью воздуха и поступает в камеру через неконтролируемые атмосферные течи [2,3]. Водород и окисль углерода СО, массовое число которой также как у азота 28, поступают на стенки за счет диффузии из глубинных слоев, причем диффузия водорода преобладает. Кислород составляет 21% потока воздуха, натекающего в камеру извне. Однако, как показано в [4], его парциальное давление в камере на порядок меньше, чем азота. Поэтому вклад кислорода в процессы, происходящие в камере, можно не учитывать. Очевидно, что соотношение компонентов, адсорбированных на поверхности, соответствует их

процентному содержанию в остаточном газе камеры, так как слой поддерживается в равновесном состоянии за счет соударений с молекулами остаточного газа. Видимо, таким же должно быть отношение вероятностей десорбции газов бомбардирующими стенку ионами, а значит, и отношение приращений давления этих компонентов. В настоящей работе давление измерялось по току насосов НМД-0.4 [4]. 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 $5 \cdot 10^{-7}$ против $1 \cdot 10^{-6}$ mm Hg (Torr) в 2006 г.

Все упомянутые газы находятся на поверхности камеры в хемосорбированном состоянии с энергией связи 30–40 kcal/mol [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 eV [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.

1. 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 GeV составляет $\chi - 1.34 \cdot 10^9$ ion/(prot. · Torr · s) в пересчете на давление 1 Torr. При N циркулирующих протонах и коэффициенте ИСД η mol/ion скорость десорбции с учетом того, что

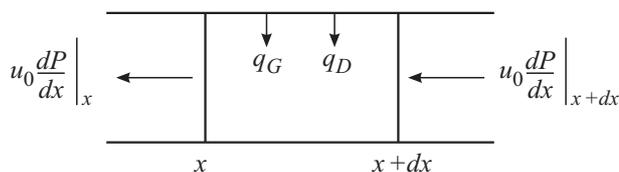


Рис. 1. Схема изменения потока газа в элементе длины камеры.

бомбардирующий ион захватывается стенкой камеры, составляет $\chi N(\eta - 1)$ mol/(Torr · s). Так как в 1 cm^3 объема камеры при давлении 1 Torr и комнатной температуре содержится $\alpha = 3.25 \cdot 10^{16}$ mol/cm³, то на 1 cm длины камеры при длине орбиты L cm за счет ИСД выделяется в 1 s следующий объем газа:

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

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:

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

где u_0 — удельная пропускная способность камеры по данному газу, P — давление в камере при наличии пучка протонов, а q_G и q_D — поток газовой выделения и поток ИСД с 1 cm длины камеры.

Рассмотрим участок камеры длиной l , середина которого является началом координатной оси x , а на концах в точках $-l/2$ и $l/2$ находятся центры присоединительных патрубков однотипных магниторазрядных насосов с одинаковой эффективной быстротой действия в этом сечении. Давление в камере без пучка отметим индексом ноль P_0 . Рассмотрим как меняется парциальное давление водорода. Уравнение для изменения давления водорода по длине камеры имеет следующий вид:

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

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) можно искать в следующем виде:

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

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

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

Из полученного решения можно определить λ и σ , а также коэффициент ИСД η , используя соотношение (1). Это можно сделать, например, следующим образом. Потоки 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. Тогда для точек $-l/2$ и $l/2$ можно записать следующие соотношения:

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

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 водороду 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 газовыделения участка между серединами камер справа и слева от этого насоса. ИСД увеличивает газовую нагрузку пропорционально давлению и длине участка. Поэтому 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 определить λ .

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:

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

\bar{P} вычисляется интегрированием решения (6) от $-l/2$ до $l/2$ и делением на длину l . 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 сеансе 2011 г. работы ускорителя, дает величину коэффициента ИСД по водороду $\eta_{H_2} = 75$. Произведение $\sigma \bar{P} = q_D$ является потоком десорбции с 1 см длины камеры в 1 с.

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

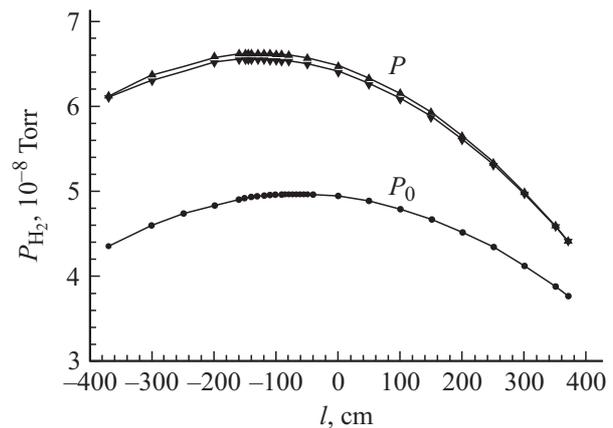


Рис. 2. Изменение давления водорода по длине камеры с номером 70.

подтверждает возможность вычисления коэффициента ИСД с помощью среднего давления \bar{P} и может быть использовано для определения коэффициента ИСД по азоту.

Рассмотрим теперь, как меняется парциальное давление азота. Можно предположить, что максимум давления азота в каждой i камере как с пучком, так и в его отсутствие приходится на места расположения воздушных течей, известные по предыдущим работам [3,4] как точки a_i . Это упрощает рассмотрение изменения давления азота, так как нахождение общего решения уравнения, подобного (3), представляет определенные трудности. Уравнение, описывающее изменение давления азота по длине камеры, имеет 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 [4]. 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 камеры. Решение (9) имеет вид

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

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 насо-

сов на обоих концах камеры:

$$\begin{aligned} x = -l/2 \quad u_0 \frac{dP}{dx} &= SP_1K_1; \\ x = l/2 \quad -u_0 \frac{dP}{dx} &= SP_2K_2; \end{aligned} \quad (12)$$

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. Согласно [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 [4], то можно определить поток Q_i в данной камере, используя методику [3], по формуле

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

Таким образом, значения всех величин будут известны, и из (12) можно определить поток десорбции $Q_D = q_D l$, который равен потоку, откачиваемому обоими насосами из данного i промежутка:

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

Этот поток аналогичен (8) в случае водорода. Значения q_D , полученные из (12)–(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 1с на 1см длины камеры. Проинтегрировав решение (11) от $-l/2$ до $l/2$ и разделив на l , из q_D находим σ для азота.

На рис. 3 приведены графики изменения давления азота по длине камеры 70 с пучком и без пучка.

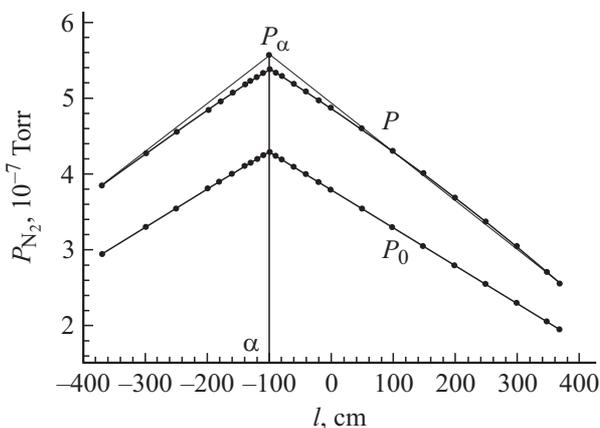


Рис. 3. График изменения давления азота в камере номер 70.

В отсутствие 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 a :

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

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 рис. 3. Определив разными методами среднее σ , найдем из (1) коэффициент ИСД азота $\eta_{N_2} = 46$. Методика определения η 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 газах, адсорбированных на поверхности камеры, водорода меньше, чем азота из-за его более низкого давления в объеме. Однако поток бомбардирующей 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 выбиваться и ионами азота. Кроме того, проводимость камеры и быстрота действия насосов по водороду больше, чем по азоту. Учет всех этих факторов, а также потока диффузии водорода из глубины стенок представляет определенные трудности. 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 статического веса каждого компонента в общем давлении в камере

$$\eta = \frac{\eta_{H_2} P_{H_2} + \eta_{N_3} P_{N_3}}{P_{H_2} + P_{N_2}} \approx 50. \quad (16)$$

Полученные значения коэффициентов ИСД интересно сравнить с результатами более ранних работ, в которых ионно-стимулированная десорбция рассматривалась в связи с разработкой в ИФВЭ проекта ускорительно-накопительного комплекса (УНК) на энергию 3 TeV [7–9]. В стационарной части решения уравнения, подобного (5), после ряда преобразований было

получено следующее приближенное выражение для коэффициента ИСД [9]:

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

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 $1.5 \cdot 10^{-6} (\text{cm}^3 \cdot \text{Torr})/\text{s}$. При современных параметрах камеры У-70, 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 в цикле.

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

В указанном выше сеансе работы ускорителя 2011 г. наряду с протонами проводились эксперименты с легкими ионами и был ускорен пучок шестизарядных ядер углерода $^{12}\text{C}^{6+}$ с интенсивностью $(1-4) \cdot 10^9$ ионов за 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 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 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 должны 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 на 1 ион пучка на Torr в секунду. 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 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 eV, равную, как

указывалось выше, средней энергии десорбции одной частицы, в случае углерода требуется соответственно 17 бомбардирующих ионов. Однако скорость образования ионов остаточного газа в случае углерода, согласно приведенной выше оценке, в 200 раз больше, чем у протонов. Поэтому в случае углерода энергетически возможна ИСД с коэффициентом 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 азота составляет по (17) величину около 120 mol/ion 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.

3. Критический коэффициент ИСД

Определенный практический интерес представляет критический коэффициент ИСД (η_{cr}), после достижения которого нет стационарного решения уравнений и давление начинает экспоненциально возрастать, что соответствует упомянутому 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:

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

где γ_1 — первый корень трансцендентного уравнения

$$\gamma \operatorname{tg}(\gamma l/2) = S/2u_0. \quad (19)$$

Условием устойчивости работы вакуумной системы является $\eta < \eta_{\text{cr}}$. 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: $\eta_{\text{cr,N}_2} \approx 310$ и $\eta_{\text{cr,H}_2} \approx 820$. 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), (19), критический коэффициент ИСД для азота станет меньше почти в 3, а для водорода в 2.5 раза. Поэтому 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 возможны 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.

4. Влияние аргона на ИСД в камере У-70

В заключение полезно оценить возможное влияние аргона на ИСД в связи с малой быстротой действия насосов по аргону сравнительно с другими компонентами остаточного газа. Как показано в [4], 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 $\eta_{\text{кр, Ar}} \approx 32$. 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 [4]. Поэтому число ионов аргона составляет около трех процентов от числа ионизированных молекул азота. Так же 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 или 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 магнитоэлектрических насосов при подготовке к сеансу

работы ускорителя, когда давление в камере в течение нескольких десятков, а то и сотен часов составляет $10^{-5} - 10^{-4}$ Торр. 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 магнитоэлектрических 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 $\eta_{\text{кр, Ar}}$, после чего инициируется лавинообразное возрастание давления в камере. Возможно, что явление, которое 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.

Заключение

Таким образом, основным результатом проведенных исследований является разработка и обоснование методики, позволяющей достаточно надежно оценить величины реальных и критических коэффициентов ИСД главных компонентов остаточного газа вакуумной камеры ускорителя У-70. Значение коэффициентов ИСД для азота и водорода составляют соответственно 46 и 75 mol/ion при средней интенсивности $2.7 \cdot 10^{12}$ протонов за цикл. Представлены соображения относительно возможной роли аргона как инициатора резкого повышения давления в камере и даны рекомендации по уменьшению негативного влияния аргона, уменьшению критических коэффициентов ИСД компонентов и улучшению работы вакуумной системы ускорителя. В работах [7–9], а также в других работах по исследованию ИСД, роль аргона не рассматривалась, и этот вопрос не обсуждался. Впервые проведена также оценка коэффициента ИСД для пучка ускоренных ионов углерода. Полученные результаты представляют интерес для вакуумных систем и камер ускорительно-накопительных комплексов.

Список литературы

- [1] *Fisher E.* CERN-ISR-VA/72–39, Geneva, 1972.
- [2] *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. Серпухов, 2009.
- [3] *Кивер А.М., Лапыгин В.Г., Ларионов А.В., Мирзоев К.Г.* Герметичность вакуумной камеры протонного синхротрона У-70. Препринт ИФВЭ 2009-11. Серпухов, 2009.
- [4] *Кивер А.М., Лапыгин В.Г., Ларионов А.В., Мирзоев К.Г.* Исследование вакуумной камеры протонного синхротрона У-70. Препринт ИФВЭ 2011-1. Серпухов, 2011.
- [5] *Левин Г.* Основы вакуумной техники. М.: Энергия, 1969. С. 42.
- [6] *Черепнин Н.В.* Сорбционные явления в вакуумной технике. М.: Советское радио, 1973. С. 357.
- [7] *Мирзоев К.Г., Rogozinskiy V.G., Ushkov V.L.* Методика расчета и некоторые проблемы разработки криогенной вакуумной камеры ускорительно-накопительного комплекса на сверхпроводящих магнитах. Препринт ИФВЭ 1977-119. Серпухов, 1977.
- [8] *Мирзоев К.Г., Rogozinskiy V.G., Ushkov V.L., Habibullin A.A.* Динамика давления при ионно-стимулированной десорбции газа в вакуумной камере протонного синхротрона. Препринт ИФВЭ 1980-72. Серпухов, 1980.
- [9] *Rogozinskiy V.G., Ushkov V.L.* Влияние пучка на давление в вакуумной камере протонного синхротрона ИФВЭ. Препринт ИФВЭ, 1977-71. Серпухов, 1977.