

81031

+



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 4-9-2007-92

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

2007
Дубна 199

ОБЪДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б4-9-2007-92

О.И.Бровко, А.В.Бутенко, И.Б.Иссинский,

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ПУЧКА В НУК.ЛОТРОНЕ НА ОСТАТОЧНОМ
ГАЗЕ**

25.06.2007

Дубна
2007

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

АННОТАЦИЯ

Согласно проекту интенсивность ускоренного пучка дейтронов Нуклотрона /1/ должна быть $\sim 10^{11}$ частиц/цикл. В настоящее время она составляет $\sim 10^{10}$ частиц/цикл. При нормальной настройке и использовании режима адиабатического захвата частиц в ускорение интенсивность в конце цикла должна быть свыше 90% от инжестированного из ЛУ пучка, составляющего в настоящее время более 10^{11} частиц/цикл.

Существующее несоответствие заставило в течение ряда лет вести поиск причин столь больших потерь интенсивности. Вариации основных параметров ускорителя позволили определить вклад каждого из них в имеющее место снижение интенсивности. Рабочие режимы ускорителя менялись в небольших пределах, и, если при этом оставались «люфты», в пределах которых интенсивность не падала, считалось, что этот параметр не влияет на потери частиц.

Поскольку наблюдаемые потери пучка идут сразу после инъекции, исследования проводились в начальной части цикла, главным образом, с пучком, циркулирующим на столе магнитного поля 0,03Тл, соответствующего энергии инъекции (5МэВ/нукл). Преимущество такого режима состоит также в «разделении неизвестных», т.е. исключении факторов, связанных с ростом магнитного поля и энергии пучка, а также более четкой интерпретации полученных результатов.

Эксперименты, проделанные на пучке дейтронов, показали, что значительный (а возможно и основной) вклад в потери вносит рассеяние частиц на остаточном газе. Измерения показали, что реальное давление в камере составляет в пересчете на комнатную температуру $\sim 10^{-5}$ Па ($\sim 10^{-7}$ Торр). Ранее считалось [2,3,4], что давление в пучковой камере, ниже, чем 10^{-7} – 10^{-8} Па, и этот параметр не может влиять на потери частиц.

Наблюдение пучка. После однооборотной инъекции в кольцо на стол магнитного поля циркуляция пучка наблюдалась с помощью пикап-электродов. В течение нескольких оборотов («микросигнал») имеются незначительные потери. При длительной циркуляции («макросигнал») идет монотонный спад интенсивности до нуля за время 0,5-1сек. При этом характер спада одинаков для режима включенной и выключенной ВЧ. Вместе с тем, численные расчеты (см. ниже, 3.1) и эксперименты, проделанные на их основе, говорят о том, что в камере ускорителя имеется в соответствии с проектными данными свободное пространство, достаточное для его циркуляции после инъекции и последующего нормального ускорения без потерь.

На основе выполненных исследований и, в частности, того факта, что при энергии инъекции циркулирующий пучок во время циркуляции быстро полностью теряется, а при ускорении часть его выживает, можно сделать вывод, что в основе процесса лежит энергетическая зависимость. Реально, это может быть рассеяние на остаточном атмосферном газе, присутствие которого вполне вероятно на инъекционном, выводном, теплом или ускоряющих участках. Причиной могут также являться большие натекания в камеру гелия или присутствия там водорода. Существовавшее мнение, что в камере Нуклотрона вакуум лучше 10^{-7} – 10^{-8} Па, вызвало, в конце концов, сомнения, что и привело к исследованию влияния этого важного параметра ускорителя после всех других.

1. Возможности расчета потерь интенсивности. После инъекции на стол МП при рассеянии циркулирующего пучка на остаточном газе падение интенсивности носит приблизительно экспоненциальный характер:

$$N = N_{in} \exp(-t/\tau). \quad (1)$$

Постоянная времени τ спада интенсивности пучка, циркулирующего в кольцевом ускорителе, определяется как

$$\tau = K_c / n = K_p / p, \quad (2)$$

где K_c и K_p – коэффициенты, зависящие от параметров пучка (энергии, атомного номера) и ускорителя, (в частности, его аксептанса, «распределенной» бета-функции и др.), что не всегда в достаточной мере бывает известно.

n – концентрация в камере газа, на котором идет рассеяние. Она может быть взята из измеренного остаточного давления p , пропорционального концентрации, $n = p/k_{bol}T$ ($k_{bol} = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/град). Знание этого параметра с нужной степенью достоверности в большинстве случаев представляется весьма сомнительным, поскольку вакуум измеряется, как правило, с большими погрешностями, и то лишь в отдельных точках объема.

Отсюда следует, что расчеты потерь на остаточном газе априори связаны с большими неопределенностями из-за их степенной зависимости, в первую очередь, от очень грубо измеряемых величин n (или p). Ошибки могут составлять порядки, и поэтому в этих условиях интереса к таким расчетам мы не проявляли.

2. Постановка задачи и методика эксперимента. /5/ Предпочтение было отдано эксперименту, и при анализе полученных результатов вместо расчетных коэффициентов K_c или K_p были взяты значительно более достоверные, их измеренные значения, что исключало при этом и ряд других неопределенностей.

Как и в предыдущих случаях поисков причин потерь, здесь требуются изменения исследуемой величины n (или p). В данном случае это может быть сделано только в сторону увеличения концентрации (давления), поскольку в настоящее время, как известно, улучшить вакуум невозможно.

Для этого в режиме циркуляции пучка дейтронов на столе МП инъекции должен быть измерен темп потерь интенсивности вначале в рабочем режиме вакуумной системы, а затем при увеличенном давлении. Если при этом при малых добавках давления потери интенсивности заметно увеличатся, это будет означать отсутствие запаса по вакууму, и причиной потерь можно будет считать высокое давление остаточного газа. Два таких эксперимента и были выполнены – один с напуском гелия, другой – азота, которые показали большую чувствительность к малому увеличению давления. **Это подтвердило предположение, что одной из причин существенных потерь пучка является его рассеяние на остаточном газе.**

Кроме этого очень важного, но качественного результата, была также использована возможность экспериментально оценить давление (концентрацию), остаточного газа в камере.

После добавки к неизвестной концентрации n_0 известной величины Δn (полученной через измеренную добавку Δp при напуске газа в камеру) постоянная времени τ_3 будет в соответствии с (2) иметь вид:

$$\tau_3 = K_c / (n_0 + \Delta n). \quad (3)$$

(Справедливо для добавки того же газа, что и остаточный.) См. также (6).

В (2) и (3) два неизвестных n_0 и K_c . Откуда измеряемая величина

$$n_0 = \Delta n / (\tau_0 / \tau_3 - 1) \quad (4),$$

а значение

$$K_c = \tau_3 \Delta n / (1 - \tau_3 / \tau_0) \quad (5)$$

3. Эксперименты по влиянию остаточного давления на потери интенсивности. В первом эксперименте использовался гелий, во втором – азот. Оба эксперимента дали качественно одинаковый результат, однако предпочтение было отдано азоту, поскольку протяженность его распределения от места натекания вдоль камеры более определена: на холодных участках камеры азот вымораживается. Давление увеличивалось путем напуска газа через натекатель на одном из прямолинейных участков кольца (теплый, № 7). В результате, для произвольно задаваемых Δp было получено значение n_0 – остаточная концентрация, или соответствующее ему рабочее давление в камере. Уже при небольшом увеличении давления ($\approx 30\%$ от общего среднего давления в камере) характер потерь оставался, а их темп заметно увеличивался.

4. Оценка остаточного давления по результатам экспериментов. Постоянные времени экспонент при циркуляции пучка определялись из показаний интенсивности, получаемой с пикап-электродов, записанных в файлы. Из экспонент (графиков потерь) по двум точкам $N_1(t_1)$ и $N_2(t_2)$ находились τ_3 :

$$N_1 = N_i \exp(-t_1/\tau_3), \quad N_2 = N_i \exp(-t_2/\tau_3), \quad N_1/N_2 = \exp[(t_2 - t_1)/\tau_3], \quad \text{откуда } \tau_3 = (t_2 - t_1)/\ln(N_1/N_2).$$

Считалось, что главной составляющей газ в камере является гелий. Поэтому при экспериментах с напуском азота было учтено отличие сечения рассеяния дейтронов на гелии и азоте через коэффициент $(Z_N/Z_{He})^2$ (произведение $(Z_N/Z_{He})^2 \Delta n_N$ можно назвать эффективной концентрацией добавленного азота.), т.е.

$$n_{0He} = (Z_N/Z_{He})^2 \Delta n_N / (\tau_0 / \tau_3 - 1). \quad (6)$$

Протяженность повышенного давления на теплом промежутке (его длина $l=3,7\text{ м}$, а сагитта свободно пролетающей в кольцевой части молекулы до ее попадания на стенку камеры равна около $0,75\text{ м}$) была принята, как $L=3,7\text{ м}+2 \times 0,75\text{ м} = 5,2\text{ м}$, и усреднена на весь периметр $\Pi=251\text{ м}$, т.е. $L/\Pi=5,2/251=0,02$.

Результаты двух экспериментов с напуском азота в теплом (№7) промежутке, где повышалось давление на $\Delta p=2,1 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$ ($\Delta n_N=1 \times 10^{15}/\text{м}^3$) и на $\Delta p=11 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$ ($\Delta n_N=5,2 \cdot 10^{15}/\text{м}^3$) дали, согласно (6), усредненное по кольцу значение концентрации остаточного гелия $n=4 \cdot 10^{16}/\text{м}^3$ ($p=2,4 \cdot 10^{-6}\text{ Па}$) и $n=4,31 \cdot 10^{16}/\text{м}^3$ ($p=2,6 \cdot 10^{-6}\text{ Па}$), соответственно (см. ниже, Таблица 2). Измерения носят оценочный характер, однако, выполненные таким способом и с помощью манометрических датчиков, обычные показания которых $p \approx 1,1 \cdot 10^{-6}\text{ Па}$, удовлетворительно совпадают.

Для наглядности измеренное давление можно привести к давлению при комнатной температуре ($T_{кмн}/T_{He} \approx 290/4,2 = 69$), что дает $p_{кмн} = (2,4+2,6+1,1)10^{-6} \cdot 69/(3) = 1,4 \cdot 10^{-4}\text{ Па} = 1,1 \cdot 10^{-6}\text{ Торр}$.

В Таблице представлены результаты измерений давления остаточного газа в камере Нуклотрона 12.03.2005.

В столбце 1 дано начальное давление газа p в теплом прямолинейном промежутке, измеренное с помощью находящегося там датчика ПММ-2 до начала эксперимента).

В столбце 2 показано добавочное установившееся давление после напуска в этот промежуток азота. Для первого напуска $\Delta p=2,1 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$ (суммарное показание прибора $2,4 \cdot 10^{-4}\text{ Па}$), а повышение давления, усредненное по кольцу, составляет $+\Delta p = 2,1 \cdot 10^{-4} \times L/\Pi (=0,02) = 4,2 \cdot 10^{-6}\text{ Па}$. (4-я строка показывает ситуацию для первого напуска азота. Ниже даны численные расчеты для этого случая. 5-я строка – аналогично, для второго напуска.)

В столбце 3 приведено значение повышения распределенной концентрации азота в кольце $+\Delta n_N = +\Delta p/k_{bol} T_{кмн} = 4,2 \cdot 10^{-6}/(1,381 \cdot 10^{-23} \cdot 290) = 1 \cdot 10^{15}/\text{куб. м}$.

В столбце 4 дано повышение концентрации азота в пересчете на He, т.е. с учетом $(Z_N/Z_{He})^2$, эквивалентное повышение концентрации He. Эта величина составляет $+\Delta n_{He} = 12,25 \cdot 10^{15} = 1,2 \cdot 10^{16} / \text{куб. м.}$

Столбец 5 – время измерения t_1 на экспоненте интенсивности.

Столбец 6 – величина интенсивности в этот момент в относительных единицах.

Столбцы 7 и 8 – аналогично предыдущим для второй точки экспоненты t_2 .

Столбец 9 – начальная амплитуда (максимум) экспоненты.

Столбец 10 – постоянные времени спада интенсивности для разных давлений.

Столбец 11 – концентрация в камере $4 \cdot 10^{16} / \text{куб. м.}$, полученная, согласно (6), из опыта.

Столбец 12 – то же для давления остаточного газа (гелия).

Из представленных в таблице результатов следует, что изменение имеющейся концентрации газа в камере на $+\Delta n_{He}/n_0 = 30\%$ (а соответственно, и приведенного давления) уменьшает постоянную времени потерь со 102 мс до 78 мс (аналогично, для 13 % это 40 мс).

5. Экспериментально полученные значения концентрации и давления в камере Нуклотрона

Таблица

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Начал. р теп. Па	Добавл Δp теп. Па	Усредн. по П $+\Delta n_N / \text{м}^3$	Усредн. по П $+\Delta n_{He} / \text{м}^3$	t_1 , мс	N_1 , отн. ед.	t_2 , мс	N_2 , отн. ед.	N_0 , отн. ед.	τ , мс	n_0 получ. $1 / \text{м}^3$	p_0 Па $T=10K$
$2,6 \times 10^{-5}$	0	0	0	28	38	108	17,3	50	τ_0 102		
$2,6 \times 10^{-5}$	$2,1 \times 10^{-4}$	1×10^{15}	$1,2 \times 10^{16}$ 30% n_0	28	47	108	17,0	67	τ_{31} 78	4×10^{16}	$5,7 \times 10^{-6}$
$2,6 \times 10^{-5}$	11×10^{-4}	$5,2 \times 10^{15}$	$6,2 \times 10^{16}$ 140% n_0	28	32	108	4,3	64	τ_{32} 40	$4,3 \times 10^{16}$	$6,2 \times 10^{-6}$

Исходя из эксперимента, зависимостей (5) и (6), теперь легко определить K_c для эффективной концентрации азота :

$$K_c = \tau_3 (Z_N/Z_{He})^2 \Delta n_N / (1 - \tau_3 / \tau_0), \quad (7)$$

среднее численное значение которого составляет $K_c = 4,9 \cdot 10^{19} \text{ с/куб.м.}$

Полученные результаты показывают, что рабочий вакуум в Нуклотроне более чем на два порядка хуже того, что задавалось при разработке проекта Нуклотрона. /6/. (Следует отметить, что в камере Синхрофазотрона объемом 200 куб. м после установки криопанелей давление в ней было того же порядка. Давление в теплой камере синхротрона ИТЭФ составляет $8 \cdot 10^{-9} \text{ Торр.}$)

6. Оценка погрешностей. Следует еще раз подчеркнуть, что полученные результаты являются скорее качественными и не претендуют на высокую точность измерений. Вместе с тем, при рассмотрении полученных результатов следует оценить степень их достоверности через допущения и погрешности, которые имели место при проведении экспериментов.

1) В приведенных выше рассуждениях принималось, что остаточным газом в камере Нуклотрона является гелий, и бралось отношение эквивалентной гелию добавочной концентрации газа (что было сделано вполне корректно) к общей концентрации газа в камере. Вопрос состоит в том, насколько правомерно предполагать, что это гелий.

В этих измерениях считалось, что имеется большая вероятность присутствия водорода, а также на отдельных участках азота. Однако их доля, по-видимому, относительно мала. Кроме того, усредняя атомный номер водорода и азота, получим некое «эффективное» значение $Z=4$, что всего лишь в два раза больше, чем для гелия, которого в камере, по мнению специалистов, присутствует значительно большая доля.

В этом случае данная погрешность не будет слишком большой или, по крайней мере, не будет иметь принципиального значения.

2) Температура стенок вакуумной камеры, или газообразного гелия, бралась равной $4,2\text{K}$. На самом деле она может достигать десятка K и выше. И опять-таки, поправка в оценках давления на этот фактор, равный $2 - 3$, не столь уж велика, т.к. зависимость давления от температуры линейная.

Таким образом, суммарная погрешность в эксперименте, очевидно, лежит в пределах полпорядка, что для данной проблемы, вряд ли, может препятствовать ее решению. Кроме того, измерения вакуума пучком всего лишь в $2,5$ отличается от измерений датчиками давления.

3) Значения K_c по двум экспериментам с напуском азота составляют: $K_c(1) = 4,879 \cdot 10^{19}$ с/куб.м и $K_c(2) = 4,997 \cdot 10^{19}$ с/куб.м , что дает среднее значение $K_c = 4,94 \cdot 10^{19}$ с/куб.м . Относительная погрешность в этом случае составляет около 1% .

7. Требуемый вакуум. Итак, согласно (1)

$$N = N_{in} \exp(-n t / K_c) \quad (8)$$

или, (что то же, но для удобства) через декремент потерь $D_c = 1/K_c$,

$$N_{in} \exp(-D_c n t) \quad (9)$$

Тогда требуемая концентрация

$$n = - \ln(N/N_{in}) / D_c t. \quad (10)$$

На основании полученного из эксперимента значения $D_c = 2,86 \cdot 10^{-15} \text{с}^{-1}$ и выбранного N/N_{in} из (9) можно достаточно достоверно оценить, какой вакуум требуется для допустимых потерь инжектированного пучка.

Так, например, для дейтронов, рассеиваемых на гелии, для потерь 10% за время 1с , это дает $n = 3,5 \cdot 10^{15} / \text{куб.м.}$, или давление гелия, при котором производятся измерения (около $4,2\text{K}$), должно быть $p = 2 \cdot 10^{-7} \text{Па}$ ($1,5 \cdot 10^{-9} \text{Torr}$). Для 1% и $t = 10\text{с}$ это составляет $p = 2 \cdot 10^{-9} \text{Па}$ ($1,5 \cdot 10^{-11} \text{Torr}$).

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам научно-экспериментальных подразделений, оказавшим помощь при обсуждении и выполнении этих работ.

Литература

1. Б.В. Василишин, И.Б. Иссинский, В.А. Михайлов, М.Н. Таровик, Расчет Нуклотрона, 9-86-512, ОИЯИ, 1986.
2. А.М. Baldin, Status and Programme at Nuclotron, E1-92-487, JINR, 1992.
3. А.М. Baldin et al. Cryogenic System of the Nuclotron, E9-93-273, JINR, 1993; Conference 12-16 Jule 1993, Albuquerque, USA.
4. A.D.Kovalenko, EPAC94, London 1994, Vol.1, p.161.
5. <http://nucloserv.jinr.ru/index.htm> >Nuclotron
6. В.Андропов, И.Иссинский, Т.З на вакуумную систему Нуклотрона, 01.03.1989г