

P9-2007-107

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

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПОТЕРЬ  
ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА НУКЛОТРОНА  
(2002–2005 гг.)**

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

P9-2007-107

Эксперименты по исследованию потерь интенсивности пучка нуклотрона (2002–2005 гг.)

Изучались потери пучка в нуклотроне в начале цикла ускорения. Полученная в настоящее время интенсивность ускоренного пучка на порядок меньше проектного значения и составляет  $\sim 10^{10}$  частиц в цикле. Вариации основных параметров ускорителя позволили определить вклад каждого из них в имеющие место потери. Каждый из рабочих режимов менялся в небольших пределах, и если при этом интенсивность не падала, то считалось, что данный параметр не влияет на потери частиц.

Эксперименты, выполненные в 2002–2005 гг. на пучке дейтронов, показали, что значительный вклад в потери может вносить рассеяние частиц на остаточном газе. По результатам измерений видно, что среднее давление в пучковой камере составляет  $\sim 10^{-5}$  Па, что соответствует концентрации остаточного газа  $2 \cdot 10^{17}$  молекул/м<sup>3</sup>. Ранее считалось, что давление в камере ниже  $10^{-7}$  Па и этот параметр не может влиять на потери частиц.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007

Issinsky I. B., Brovko O. I., Butenko A. V.

P9-2007-107

Research of Beam Intensity Losses at the Nuclotron (2002–2005)

Beam losses in the Nuclotron were investigated at the beginning of the acceleration cycle. Today intensity,  $\sim 10^{10}$  ppp, is an order less than projected magnitude. Variations of main accelerator parameters permitted us to define a role each of them plays in existing losses. Each of the operation conditions changed inside small limits, and if the intensity did not reduce in this case, the parameter was considered to have no effect on losses.

Experiments performed with deuteron beam in 2002–2005 showed that essential contribution to losses can be from particle scattering by residual gas. According to the measurements the mean pressure in the beam chamber is  $\sim 10^{-5}$  Pa. So far it was believed that the pressure in the chamber is below  $10^{-7}$  Pa and this parameter could not influence particle losses.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007

## ВВЕДЕНИЕ

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 инжектированного из линейного ускорителя 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.

Эксперименты, проделанные в 2002–2005 гг. на пучке дейтронов, показали, что при энергии инжекции значительное влияние на потери частиц при их циркуляции оказывает остаточный газ в камере ускорителя. Измерения, выполненные по времени жизни пучка, дали среднюю по периметру концентрацию газа  $2 \cdot 10^{17}$  молекул/м<sup>3</sup>, что составляет  $\sim 8 \cdot 10^{-5}$  Па. Ранее считалось [2–4], что давление в пучковой камере ниже чем  $10^{-7} - 10^{-8}$  Па.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При поиске причин потерь интенсивности в начале цикла ускорения нуклотрона примерно на порядок была поставлена задача исследовать и определить критичность рабочих режимов и характеристик ускорителя по их влиянию на потери интенсивности. В их число входило:

- 1) достаточность коррекции орбиты в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- 2) правильность (оптимальность) режима инжекции пучка из канала линейного ускорителя в кольцо нуклотрона;
- 3) наличие достаточного пространства в камере нуклотрона для последующего после инжекции ускорения пучка без потерь;

- 4) качество магнитного поля в структурных диполях;
- 5) качество магнитного поля в структурных квадрупольях;
- 6) близость к резонансам бетатронных колебаний;
- 7) качество ВЧ ускоряющего поля;
- 8) достаточность вакуума в пучковой камере ускорителя.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Поскольку наблюдаемые потери пучка идут сразу после инжекции, исследования проводились в начальной части цикла, главным образом с пучком дейтронов, циркулирующим на столе магнитного поля 0,03 Тл, соответствующего энергии инжекции 5 МэВ/нуклон. 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.

После однооборотной инжекции в кольцо (длительность оборота  $t_0 = 8,2$  мкс) на стол магнитного поля циркуляция пучка наблюдалась с помощью пикап-электродов и ионизационного датчика. В течение первых нескольких оборотов («микросигнал») пучок имеет сравнительно малые потери. При длительной циркуляции («макросигнал») идет монотонный спад интенсивности до нуля за время 0,5–1 с. При этом характер спада одинаков как для режима при включенной, так и при выключенной ВЧ. Численные расчеты (см. ниже) и эксперименты, проделанные на их основе, показывают, что в камере ускорителя имеется в соответствии с проектными данными свободное пространство, достаточное для его циркуляции после инжекции и последующего ускорения без потерь.

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ УСКОРИТЕЛЯ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДО 2005 Г.

*Орбита. Размеры камеры, выбранные при проектировании, ее заполнение.* При разработке проекта нуклотрона был заложен значительный запас по апертуре (и не только) вакуумной камеры ускорителя. Идеология проектирования состояла в следующем. При подходе к решению важнейшей задачи по созданию новой базовой установки лаборатории, с учетом ситуации и тенденций, имевших в то время место, нами было принято решение заложить три степени защиты, выполнение каждой из которых, по идее, должно было гарантировать нормальную работу ускорителя. В связи с этим потребовалось выполнить ряд процедур.

1. Были заложены жесткие, но реально осуществимые требования на допуски магнитного поля и геодезию, не превосходящие по жесткости общепринятые мировые стандарты. В этом случае искажения орбиты не должны были превышать 2–3 мм [1, 5]. По части магнитных допусков эти требования в пределах доступного нам контроля были практически полностью выполнены. Имеющие место в настоящее время искажения нескорректированной орбиты свыше 30 мм можно объяснить отступлением при монтаже от требований на пространственное положение структурных магнитных элементов кольца, изменением их положения при охлаждении или деформацией фундамента.

2. При проектировании поперечный размер вакуумной камеры был увеличен по горизонтали в полтора раза, по вертикали — на 10 % относительно необходимого. Дальнейшее увеличение коэффициента запаса по вертикали привело бы к значительному (примерно в два раза) повышению электроэнергии, потребляемой ускорителем.

3. Разработана динамическая мультипольная система коррекции магнитного поля (МП) ускорителя (прямые и косые дипольные, квадрупольные, секступольные и октупольные корректоры) [6].

Кроме изложенной здесь существовала (и продолжает существовать) точка зрения, согласно которой главной причиной столь больших потерь пучка являются искажения орбиты и, следовательно, недостаточное пространство для ускоряемого пучка. В поставленной нами задаче требовалось ответить на главный вопрос: имеется ли в камере *свободное пространство*, достаточное для инъекции пучка без потерь и его ускорения без адиабатического захвата с эффективностью не менее 50 %. Измерения дали положительный ответ. Для разработанного и подготовленного к экспериментам режима адиабатического захвата этого пространства в камере нуклотрона также достаточно для его реализации. В целом это позволит ускорять до 100 % пучка, поступающего в кольцо из линейного ускорителя.

**Свободное пространство в камере.** В соответствии с проектными данными критические точки по заполнению горизонтального пространства находятся в линзах  $\Phi$  прямолинейных промежутков, где дисперсионная функция максимальна и составляет  $\Psi \approx 4$  м. Пространство, занимаемое инжектируемым пучком, имеющим *измеренное значение*  $(\Delta p/p)_{\text{инж}} = \pm 5 \cdot 10^{-4}$  [7], благодаря *дисперсии* орбит составляет

$$\Delta x_p = \Psi(\Delta p/p)_{\text{инж}} = \pm 2 \text{ мм.}$$

Значение  $(\Delta p/p)_{\text{инж}}$  может быть также замерено по длительности дебанчировки циркулирующего пучка после инъекции. Оно составляет 4 мс, что соответствует той же величине.

Здесь же для бетатронных колебаний и  $\varepsilon_x = 30\pi$  мм · мрад (также *измеренная величина* [8]) при удовлетворительной инъекции пучка на горизон-

тальную орбиту, когда когерентные колебания достаточно малы,

$$\Delta x_{\text{бет}} = (\varepsilon_x \beta / \pi)^{1/2} = \pm 19 \text{ мм.}$$

В случае искажения орбиты в тех же точках, равном, например,  $\pm 10$  мм, свободное пространство, остающееся в камере (ее полная апертура по горизонтали равна 118 мм), составляет

$$\Delta x_{\text{бет}} = \pm(59 - 19 - 2 - 10) = \pm 28 \text{ мм.}$$

Однако самой *критической точкой* в настоящее время является *выводной участком*, где горизонтальная апертура «зарезана» с внешней стороны кольца электростатическим септумом и магнитами Ламбертсона, расположенными рядом с линзами 5Ф1 и 5Ф2. Здесь свободная часть горизонтальной апертуры составляет 90 мм. Тогда, если на данном азимуте эмпирически удастся достигнуть оптимального положения бампа орбиты  $\Delta x_{\text{бам}} = -15$  мм, *оставшаяся для ускорения часть апертуры* будет составлять

$$\Delta x_{\text{мв}} = \pm(45 - 19 - 2) = \pm 24 \text{ мм,}$$

которой вполне достаточно как для инъекции пучка, так и для его *циркуляции* на столе МП *без потерь* (даже при возможных когерентных колебаниях с большой амплитудой из-за неточности посадки инжектируемого пучка на орбиту). И самое главное — такое пространство позволяет расширить импульсный спектр пучка при его захвате в синхротронный режим (в том числе режим адиабатического захвата) в 12 раз, т.е. до  $\pm 6 \cdot 10^{-3}$ . Это условие удовлетворяет режиму нормального ускорения без потерь [9].

По этой причине имеющие место оставшиеся после коррекции искажения орбиты не могут влиять на потери пучка.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

**Участок инъекции.** а) Изменения тока в *горизонтальном корректоре* ДК6 канала транспортировки пучка из линейного ускорителя в пределах от 1,5 до 2,3 А, составляющих  $\pm 20\%$  от оптимального тока 1,9 А, соответствуют изменению горизонтального угла пучка около  $\pm 0,5$  мрад. Значительного спада интенсивности при этом не наблюдается.

б) Аналогичные изменения *напряжения* на инфлекторных пластинах (ИП) от 21,6 до 19,7 кВ ( $\pm 5\%$  от оптимального значения угла поворота,  $\approx 0,02$  рад), возбуждающие вертикальные колебания с амплитудой порядка 5 мм, также не дают заметных изменений в общей картине тока циркулирующего пучка.

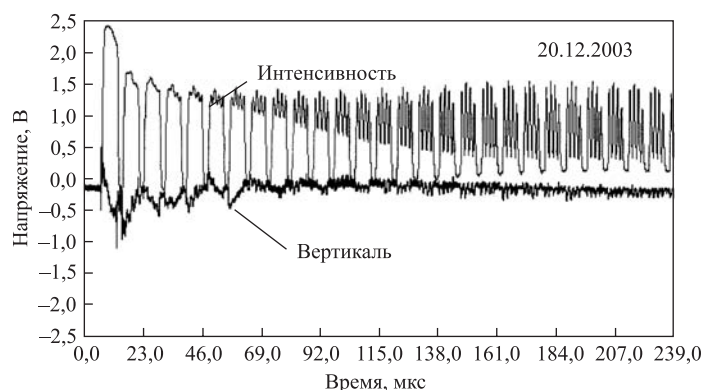


Рис. 1. Интенсивность и вертикальное положение пучка (в относительных единицах) на первых оборотах после инъекции и захвате в ускорение

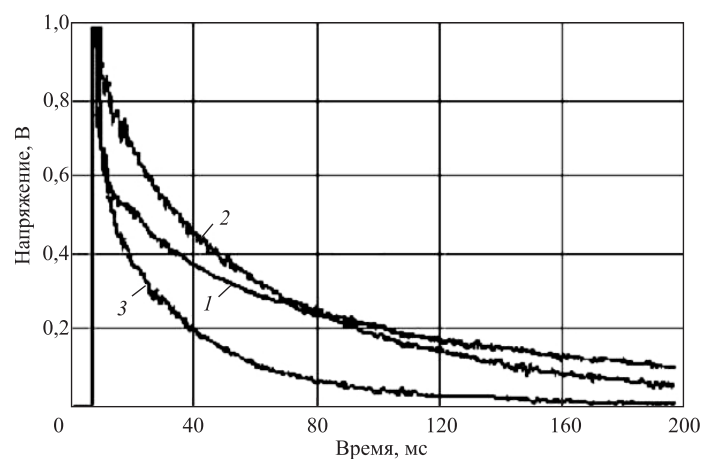


Рис. 2. Спад интенсивности пучка на столе инъекции при разных значениях давления в вакуумной камере: 1 — начальное давление  $\Delta p = 0$ ; 2 — добавочное давление  $\Delta p = 30\%$ ; 3 — добавочное давление  $\Delta p = 140\%$

Эти результаты получаются также при рутинных повседневных настройках. Из этого следует, что углы инъекции близки к оптимальным и не являются критичными.

Осциллограммы сигналов интенсивности циркулирующего пучка с пикап-электродов (рис. 1) в режиме стола инъекции показывают, что после первых 3–4 оборотов имеет место снижение интенсивности на 40–50%, что в данном случае можно объяснить потерями по вертикали, и, скорее всего, это не является принципиальным. Оставшаяся часть пучка в дальнейшем долгое время

продолжает циркулировать, медленно (сотни миллисекунд) спадая до нуля (рис. 2). Однако здесь нет достаточной ясности, связанной с ограниченностью свободного пространства вакуумной камеры по вертикали, и требуется продолжение поиска оптимальных условий режима инъекции.

**Измерение свободного пространства в камере по горизонтали, пригодного для ускорения пучка без потерь.** а) Изменение уровня магнитного поля на *столе инъекции*  $B_{\text{инж}} = 0,03$  на  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  Тл не приводит к снижению или изменению характера «макросигнала» спада интенсивности как при включенной, так и при выключенной ВЧ. Соответствующее этому смещение горизонтальной орбиты в максимумах составляет  $\Delta x = \pm 20 - 26$  мм, в том числе и в критической точке участка вывода, где орбита, по идее, должна быть хорошо «настроена», т.е. установлена на  $-15$  мм. Полученное оптимальное значение отношения градиента к полю  $K = G/B$  в относительных единицах составило 1,02.

б) Включение на столе магнитного поля ВЧ с задержкой 300 мкс и 1 мс от начала инъекции. При амплитуде ускоряющего напряжения до 8 кВ макроразмер пучка не менялся. После этого значения начинались потери, что говорит о расширении пучка за счет импульсного разброса и касания частицами стенок камеры. Для нуклотрона амплитуда синхротронных колебаний при ускоряющем напряжении  $U = 8$  кВ увеличивает горизонтальный размер пучка на  $\Delta x_s = \pm 0,261(U_B)^{1/2} = \pm 23$  мм. Значит, согласно и этим измерениям в камере имеется пространство, вполне достаточное для ускорения пучка без потерь.

в) Эти результаты подтверждаются также тем фактом, что на растущем магнитном поле в режим ускорения захватывается более 60 % инжектированного пучка. Для дальнейшего ускорения без потерь такого количества частиц требуется  $\pm 17$  мм, т.е. такое пространство имеется [9].

Таким образом, измерения, выполненные в 2003 г. различными способами, показали, что после инъекции пучка на орбиту в режиме стола МП *в горизонтальной плоскости камеры имеется свободное пространство в пределах от  $\pm 20$  до  $\pm 24$  мм.* Тем самым была опровергнута существовавшая (и продолжающая существовать) точка зрения, согласно которой главной причиной потерь пучка является искажение орбиты. Этим объясняется тот факт, что попытки ее сторонников с середины 90-х гг. увеличить интенсивность путем коррекции результатов не дали.

**Потери из-за близости к резонансам.** В 2003 г. менялись частоты *бетатронных колебаний (настройки)* на столе инъекции магнитного поля путем изменения тока в квадрупольных линзах:

- а) при последовательном включении тока в линзы F и D;
- б) при независимом питании линз (изменении рабочей точки в широких пределах) с помощью линз, предназначенных для медленного вывода [10].



Эти эксперименты показали тот же *характер потерь* в пределах прохождения частот от целого до полупцелого резонансов.

*Потери из-за погрешностей в ускоряющем ВЧ-напряжении.* Можно сказать, что принцип автофазировки значительно смягчает требования к ча-

**Таблица 1. Результаты экспериментов до 2005 г.**

Эксперимент	Дата	Результат
<b>Орбита</b> (при ускорении, растущее поле) Эксперименты по коррекции орбиты в плоскостях $X$ и $Y$	1995– 2005	Результатов не получено
<b>Свободное пространство в камере по <math>X</math></b> 1. Постоянство спада интенсивности на столе МП при «качании» инжектируемого пучка с помощью ДК6 на $\pm 0,5$ мрад и ИП на $\pm 1$ мрад. 2. То же при изменении стола МП $\pm$ (от 0,5 до 0,7 %) с и без ВЧ на первых мс (соответствует смещению орбиты на $x = \pm 4 \cdot 10^3 (\Delta B/B)$ мм) 3. Начало потерь циркулирующего пучка при увеличении ускоряющего напряжения до 8 кВ (соответствует расширению пучка на $x = \pm 0,261(U_B)^{1/2}$ мм)	04.03.03  10.12.02  03.07.03	Требуется продолжение экспериментов  До включения ВЧ имеется свободное пространство $\pm(20 - 24)$ мм  Имеется свободное пространство $\pm 23$ мм
<b>Свободное пространство в камере по <math>Y</math></b> Очень мало или при существующем искажении $Y$ -орбиты отсутствует. Требуются эксперименты	17.12.03	Потери интенсивности $\approx 10\%$ . Идут по вертикали только на первых оборотах
<b>Качество дипольного магнитного поля</b> Минимизирован наклон МП на столе инжекции Введена система наклона стола инжекции в пределах $\Delta B(t)/B = \pm 1\%$ Пульсации МП менее $\pm 2 \cdot 10^{-4}$	22.12.02 26.11.04	Характер потерь пучка не изменился
<b>Качество квадрупольного поля</b> Пульсации токов искусственно увеличены до больших значений	14.12.02	Заметных изменений в интенсивности не наблюдалось
<b>Близость к резонансам бетатронных колебаний.</b> Изменение $Q_x, Q_y$ в широких пределах путем включения квадрупольных линз медленного вывода	21.06.02 07.03.04	При перемещении в пределах клетки резонансов $\Delta Q = 0,5$ темп потерь не изменялся
<b>Ускоряющее ВЧ-поле на столе магнитного поля.</b> Поиск режимов	Сеансы	Зависимости пока не обнаружено

стоте и, тем более, к амплитуде ускоряющего напряжения. Эксперименты, связанные с изменением и выбором оптимальных режимов ВЧ, говорят о том, что претензий к работе ускоряющей системы при постоянном магнитном поле мы, по-видимому, предъявить не можем.

В табл. 1 сведены результаты экспериментов по поиску причин потерь пучка в нуклотроне с помощью вариаций его параметров и режимов работы, влияющих на динамику пучка (проведены до 2005 г.). Некоторые из перечисленных в ней данных были впоследствии подтверждены рядом экспериментов, проведенных другими сотрудниками в режиме растущего магнитного поля. Как можно видеть, эти эксперименты не позволили продвинуться в решении существующей проблемы.

### ПОТЕРИ НА ОСТАТОЧНОМ ГАЗЕ В КАМЕРЕ УСКОРИТЕЛЯ

На основе выполненных исследований и, в частности, того факта, что при энергии инжекции 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 инжекционном, выводном, теплом или ускоряющих участках. Причиной могут также являться большие натекания в камеру гелия или присутствие там водорода. Существовавшее мнение [2–4], что в камере нуклотрона вакуум лучше  $10^{-7} - 10^{-8}$  Па, вызвало в конце концов сомнения, что и привело к исследованию [11] влияния этого важного параметра ускорителя после всех других. Затянувшиеся при этом более чем на десятилетие изучение работы ускорителя объясняется малым временем, предоставленным для поиска оптимальных режимов его работы, связанных, главным образом, с увеличением интенсивности пучка.

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

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

Постоянная времени  $\tau$  спада интенсивности пучка, циркулирующего в кольцевом ускорителе, определяется как

$$\tau = K_c/n_0 = K_p/p, \quad (2)$$

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

$n_0$  — концентрация в камере газа, на котором идет рассеяние. Эта величина может быть взята из измеренного остаточного давления  $p$ , пропорционального концентрации,  $n = p/k_{\text{bol}}T$  ( $k_{\text{bol}} = 1,38 \cdot 10^{-23}$  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  $p$ ).

**2. Эксперименты.** 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 малых добавках давления потери интенсивности заметно увеличатся, это должно 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 может являться его рассеяние на остаточном газе.*

Кроме этого очень важного, но качественного результата, была также использована возможность экспериментальной оценки давления (концентрации) остаточного газа в камере.

После добавки к неизвестной концентрации  $n_0$  известной величины  $\Delta n$  (полученной через измеренную добавку  $\Delta p$  при напуске газа в камеру) постоянная времени  $\tau_3$  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 теплом прямолинейном участке кольца. В результате для произвольно задаваемых  $\Delta n$  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, записанной в файлы (рис. 2). Из экспонент (графиков потерь) по двум точкам  $N_1(t_1)$  и  $N_2(t_2)$  находились  $\tau_3$ :

$$N_1 = N_i \exp(-t_1/\tau_3), \quad N_2 = N_i \exp(-t_2/\tau_3), \quad N_1/N_2 = \exp[(t_2 - t_1)/\tau_3],$$

откуда  $\tau_3 = (t_2 - t_1)/\ln(N_1/N_2)$ .

Считалось, что главной составляющей газа в камере является гелий. Поэтому в экспериментах с напуском азота было учтено отличие сечения рассеяния дейтронов на гелии и азоте [12] через коэффициент  $(Z_N/Z_{He})^2 = 12,25$ . Измерение установившегося перед экспериментом давления выполнялось с помощью манометрического прибора ПММ-32-1, показания которого пропорциональны числу ионизованных двухатомных молекул азота, в связи с чем при расчетах был введен коэффициент 2 (произведение  $(2Z_N/Z_{He})^2 \Delta n_N$  можно назвать эффективной концентрацией добавки), т. е.

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

Протяженность области повышенного давления на теплом промежутке (его длина  $l = 8,42$  м, а сагитта свободно пролетающей в кольцевой части молекулы до ее попадания на холодную стенку камеры равна около 2,2 м в каждую сторону) была принята как  $L = 8,42 \text{ м} + 2 \cdot 2,2 \text{ м} = 12,8 \text{ м}$  и усреднена на весь периметр  $\Pi = 251 \text{ м}$ , т. е.  $L/\Pi = 12,8/251 = 0,051$ .

Результаты двух экспериментов с напуском азота в теплом (№ 7) промежутке, где повышалось давление на  $\Delta p = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$  ( $\Delta n_N = 2,7 \cdot 10^{15}/\text{м}^3$ ) и на  $\Delta p = 11 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$  ( $\Delta n_N = 13 \cdot 10^{15}/\text{м}^3$ ) дали, согласно (6), усредненное по кольцу значение концентрации остаточного гелия около  $n_0 = 2 \cdot 10^{17}/\text{м}^3$  соответственно (см. табл. 2).

Если для наглядности принять среднюю температуру вакуумной камеры 30 К (что довольно вероятно), то давление в ней должно составлять  $8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ .

В табл. 2 представлены результаты измерений давления остаточного газа по потерям пучка в камере нуклотрона 28.06.2004 и 12.03.2005.

В столбце 1 дано измеренное начальное давление в теплом прямолинейном промежутке до начала эксперимента.

В столбце 2 показано добавочное установившееся давление после напуска в этот промежуток азота. Для первого напуска  $\Delta p = 2,1 \cdot 10^{-4}$  Па (суммарное показание прибора  $p = 2,36 \cdot 10^{-4}$  Па), а повышение давления, усредненное по кольцу, составляет  $+\Delta p = 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot L/\Pi (= 0,051) = 1,1 \cdot 10^{-5}$  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  $+\Delta n_N = +\Delta p/k_{\text{бол}}T_{\text{комн}} = 1,1 \cdot 10^{-5}/(1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290) = 2,7 \cdot 10^{15}/\text{м}^3$ .

В столбце 4 дано эквивалентное повышение концентрации He. Эта величина составляет  $+\Delta n_{\text{He}} = 12,25 \cdot 1 \cdot 10^{15} = 1,2 \cdot 10^{16}/\text{м}^3$ .

Столбец 5 — момент времени  $t_1$  измерения 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 — полученная, согласно (6), из опыта концентрация остаточного газа (предположительно гелия) в камере, равная  $2 \cdot 10^{17}$  молекул/м<sup>3</sup>.

Столбец 12 — то же для давления остаточного газа в камере при  $T = 30$  К.

**Таблица 2**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Начал. $p$ тепл., Па	Добавл. $\Delta p$ тепл., Па	Усредн. по П, $+\Delta n_N/\text{м}^3$	Усредн. по П, $+\Delta n_{\text{He}}/\text{м}^3$	$t_1$ , мс	$N_1$ , отн. ед.	$t_2$ , мс	$N_2$ , отн. ед.	$N_0$ , отн. ед.	$\tau$ , мс	$n_0$ получ., 1/м <sup>3</sup>	$p_0$ , Па $T = 30$ К
$2,6 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	28	38	108	17,3	50	$\tau_0$ 102		
$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{15}$	$6 \cdot 10^{16}$ 30% $n_0$	28	47	108	17,0	67	$\tau_{\text{э}1}$ 78	$2 \cdot 10^{17}$	$8 \cdot 10^{-5}$
$2,6 \cdot 10^{-5}$	$11 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{15}$	$32 \cdot 10^{16}$ 140% $n_0$	28	32	108	4,3	64	$\tau_{\text{э}2}$ 40	$2,1 \cdot 10^{17}$	$8 \cdot 10^{-5}$

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

#### **5. Экспериментально полученные значения концентрации и давления в камере нуклотрона (2004–2005)**

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

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

среднее численное значение которого составляет  $K_c = 2,2 \cdot 10^{16}$  с/м<sup>3</sup>.

Полученные результаты показывают, что рабочий вакуум в нуклотроне более чем на два порядка хуже того, что задавался при разработке проекта нуклотрона [13].

**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 [14].

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 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 К. На самом деле она может достигать 10 К и выше. И опять-таки, поправка в оценках давления на этот фактор, равный 2–3, не столь уж велика, так как зависимость давления от температуры линейная.

Таким образом, суммарная погрешность в эксперименте (в оптимистическом случае) лежит в пределах полпорядка, что вряд ли может препятствовать решению данной проблемы.

3. Для измеренных значений  $n_0$  в двух экспериментах с напуском азота их разница составляет около 5 %, что говорит об удовлетворительной точности относительных измерений.

Следует отметить, что картина потерь интенсивности, полученная при проведенных экспериментах, не является до конца ясной. Это приводит к необходимости продолжения экспериментов по влиянию остаточного газа на интенсивность инжектируемого и ускоряемого пучка.

**7. Требуемый вакуум.** Если говорить об уменьшении потерь пучка для условий, в которых производились измерения (дейтроны, энергия инъекции, состав остаточного газа и др.), то можно оценить необходимую концентрацию газа в камере, при которой потери не будут превышать заданной величины. Согласно (1)

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

Тогда требуемая концентрация

$$n = -\ln(N/N_{\text{in}}) K_c / t. \quad (9)$$

Из полученного экспериментального значения  $K_c$  и выбранного  $N/N_{\text{in}}$  из (9) можно оценить требования к вакууму.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам научно-экспериментальных подразделений Лаборатории высоких энергий, оказавшим помощь при обсуждении и выполнении этих работ. Все вопросы, замечания, критика, предложения по новым экспериментам и участию в них будут с благодарностью приняты авторами.

### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НУКЛОТРОНА

Параметр	Проектный	Полученный, достигнутый
Кинетическая энергия ( $q/A = 0,5$ ), ГэВ/нуклон	6	4
Интенсивность, частиц/цикл	$2,10^{11}$	$2,10^{10}$
Частота циклов, Гц	0,4	0,1
Магнитное поле при проектной энергии, Тл	2,08	1,4
Радиус кривизны, м	22,0	21,69
Средний радиус, м	40,0	40,0
Длина орбиты, м	251,52	251,52
Энергия инъекции, МэВ/нуклон	5	5
Поле инъекции, Тл	0,0295	0,0300
Число больших прямолинейных промежутков	8	8
Число нормальных периодов	32	32
Структура нормального периода	FODO	FODO

Параметр	Проектный	Полученный, достигнутый
Длина нормального периода, м	7,86	7,86
Длительность оборота пучка при инжекции, мкс	8,1	8,1
Диапазон частоты обращения частиц, $\times 10^6/\text{с}$	(0,123–1,18)	(0,123–1,17)
Кратность ускорения	5	5
Критическая энергия, ГэВ/нуклон	7	8
Апертура диполей:		
радиальная, мм	110	110
вертикальная, мм	54	54
Апертура квадруполей, мм	$120 \times 62$	$120 \times 62$
Вакуум, Па	$10^{-8}$	$10^{-5}$
Искажения скорректированной орбиты:		
в радиальной плоскости, мм	$\pm 4$	$\pm 14^*$
в вертикальной плоскости, мм	$\pm 4$	$\pm 8^*$
Эмиттанс инжектируемого пучка $E_x = E_y$ , мм · мрад	$30\pi$	$30\pi$
Импульсный разброс инжектируемого пучка	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$
Акцептанс при скорректированной орбите		
радиальный, мм · мрад	$52\pi$	$48\pi$
вертикальный, мм · мрад	$43\pi$	$29\pi$
Дисперсионная функция $\Psi$ , максимальное значение в прямолинейных промежутках, м	2,73	4,1
Максимальное значение $\beta$ -функции $\beta_x$ , м	12,59	12,46
$\beta_z$ , м	12,40	13,36
Бегатронная частота (настройка)		
$Q_x$	6,84	7,42
$Q_y$	6,72	7,28
Динамические характеристики		
$\partial Q_x / (\partial G/G)_F$	11,5	
$\partial Q_x / (\partial G/G)_D$	-2,6	
$\partial Q_y / (\partial G/G)_F$	-2,6	
$\partial Q_y / (\partial G/G)_D$	10,3	
$\Delta Q_x / (\Delta p/p)$	-7,8	
$\Delta Q_y / (\Delta p/p)$	-10,0	
Максимальная длительность вывода пучка, с	10	10

\*Измерения 12.2002.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Василишин Б. В. и др.* Расчет нуклотрона. ОИЯИ 9-86-512. Дубна, 1986.
2. *Baldin A. M.* Status and Programme at Nuclotron. JINR E1-92-487. Dubna, 1992.
3. *Kovalenko A. D.* // EPAC-94, London, 1994. V. 1. P. 161.
4. *Kovalenko A. D.* // EPAC-2000, Vienna, 2000. P. 554–56.
5. *Акишин П. Г. и др.* Моделирование коррекции орбиты нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-90-485. Дубна, 1960.
6. *Балдин А. М. и др.* Корректорные магниты для нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-95-260. Дубна, 1995.
7. *Безногих Ю. Д. и др.* Сообщение ОИЯИ 9-12723. Дубна, 1979.
8. *Безногих Ю. Д. и др.* Сообщение ОИЯИ Б2-9-8775. Дубна, 1975.
9. *Волков В. И. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-2003-154. Дубна, 2003.
10. *Василишин Б. В. и др.* Медленный вывод пучка из нуклотрона. Сообщение ОИЯИ 9-86-511. Дубна, 1986.
11. *Бровко О. И., Бутенко А. В., Иссинский И. Б.* Сообщение ОИЯИ Б4-9-2007-92. Дубна, 2007.
12. *Мешков И. Н.* // ЭЧАЯ. 1994. Т. 25, вып. 6. С. 1487.
13. *Антропов В. К., Иссинский И. Б.* Техническое задание на вакуумную систему нуклотрона, 01.03.1989.
14. *Иссинский И. Б.* Исследование потерь пучка в нуклотроне. 07.04.2006. <http://nucloserv.jinr.ru/text.htm>

Получено 17 июля 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 27.09.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,36. Тираж 270 экз. Заказ № 55902.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)