

## ТРЕБОВАНИЯ К ВАКУУМУ В БУСТЕРЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

*А. В. Филиппов, В. А. Мончинский, В. А. Михайлов, А. Б. Кузнецов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приводятся результаты расчета потерь пучка ионов  $^{197}\text{Au}^{32+}$  при взаимодействии с атомами и молекулами остаточного газа в ускорительной камере вакуумной системы бустера ускорительного комплекса NICA [1].

The calculation results of  $^{197}\text{Au}^{32+}$  ion beam losses due to interaction with residual gases in accelerated chamber of booster's vacuum system for NICA accelerator complex [1] are presented.

PACS: 29.20.-c; 29.27.-a; 29.90.+g

### 1. БУСТЕР УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Главной задачей бустера [1] является накопление порядка  $10^9$  ионов  $^{197}\text{Au}^{32+}$  и ускорение их до энергии порядка 600 МэВ/нуклон, достаточной для последующей обдирки до состояния  $^{197}\text{Au}^{79+}$  в канале транспортировки бустер–нуклотрон, что позволяет

- получить пучок ионов  $^{197}\text{Au}^{79+}$  с максимальной энергией на выходе из нуклотрона;
- из-за уменьшения рекомбинации ионов  $^{197}\text{Au}^{79+}$  на остаточном газе существенно снизить требования, налагаемые на вакуумные условия в ускорительном канале нуклотрона;
- кроме того, применение в бустере электронного охлаждения ионов  $^{197}\text{Au}^{32+}$  на энергии 100 МэВ/нуклон уменьшает продольный эмиттанс пучка до величины, требуемой для сжатия сгустка по завершении его ускорения в нуклотроне.

Основные параметры бустера приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры бустера [1]

Сорт ионов	$^{197}\text{Au}^{32+}$
Периметр кольца, м	211,2
Эффективная длина «холодной»/«теплой» части кольца, м	176/35,2
Суперпериодичность	4
Энергия инъекции/вывода пучка, МэВ/нуклон	6,2/600
Магнитная жесткость, Тл·м	2,5–25
Максимальное поле в магнитах, Тл	0,18
Частота повторения циклов, Гц	0,25
Скорость роста магнитного поля, Тл/с	1
Тип инъекции пучка	Две однооборотные
Тип вывода пучка	Однооборотный
Время накопления пучка, с	0,8
Средний вакуум, пТорр	10–100

## 2. МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРЬ ПУЧКА

Механизмы потерь пучка в ускорителях хорошо известны и описаны во многих работах, например [2–5]. Основными процессами потерь многозарядных ионов в кольцевых ускорителях, оказывающими влияние на вакуум, являются перезарядка ускоряемых ионов на атомах и молекулах остаточного газа и сама ионизация этих молекул. В первом случае перезаряженные ионы отклоняются диполями периодической структуры и с ускоренной энергией под малым углом достигают стенок камеры ускорителя. Во втором случае ионы остаточного газа ускоряются потенциалом пучка и с малой энергией падают на стенки перпендикулярно. В обоих случаях в камеру поступает большое количество десорбированных со стенок камеры молекул, однако согласно [3] процесс перезарядки ускоряемых ионов на атомах и молекулах остаточного газа является доминирующим.

Основываясь на полуэмпирических формулах Франзке [4], ниже проведем численный расчет потерь пучка ионов  $^{197}\text{Au}^{32+}$  в процессе перезарядки на остаточном газе вакуумной камеры бустера нуклотрона ускорительного комплекса NICA [1].

## 3. СЕЧЕНИЯ ПЕРЕЗАРЯДКИ

Сечения перезарядки ( $\sigma_{q \rightarrow q-1, Z_T}$  захвата и  $\sigma_{q \rightarrow q+1, Z_T}$  потери одного электрона) ионов с зарядом  $q$  на атомах и молекулах остаточного газа согласно [4]

$$\begin{aligned} \sigma_{q \rightarrow q-1, Z_T} &= \frac{2 \cdot 10^{-24} \bar{Z}^2 \bar{Z}_T}{(\gamma^2 - 1)^2 \sqrt{\bar{Z}}} \left( \frac{q}{\bar{Z}} \right)^a, & \sigma_{q \rightarrow q+1, Z_T} &= \frac{3,5 \cdot 10^{x-18} \bar{Z}_T}{\sqrt{\gamma^2 - 1} \bar{Z}^2} \left( \frac{q}{\bar{Z}} \right)^b, \\ \bar{Z} &= Z \left( 1 - e^{-\alpha^{-1} \beta Z^{-2/3}} \right), & \bar{Z}_T &= Z_T \left( 1 - e^{-\alpha^{-1} \beta_T Z_T^{-2/3}} \right), \\ \gamma &= 1 + \frac{E}{E_u}, & \beta &= \sqrt{\frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2}}, & \gamma_T &= 1 + \frac{k_B T}{m_T c^2}, & \beta_T &= \sqrt{\frac{\gamma_T^2 - 1}{\gamma_T^2}}, \\ x &= 0,6 \lg^{1,5} Z, & a &= \begin{cases} 2, & q \geq \bar{Z}, \\ 4, & q < \bar{Z}, \end{cases} & b &= \begin{cases} -4, & q \geq \bar{Z}, \\ -2,3, & q < \bar{Z}. \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\bar{Z}$  и  $\bar{Z}_T$  — равновесное зарядовое состояние ионов пучка и частиц остаточного газа соответственно;  $Z$  и  $Z_T$  — атомный номер ионов пучка и частицы остаточного газа;  $\gamma$  и  $\gamma_T$  — релятивистский фактор ионов пучка и частиц остаточного газа;  $m_T$  — масса покоя атома или молекулы остаточного газа в граммах;  $E$  — энергия ионов пучка в МэВ/нуклон;  $E_u = 931,5$  МэВ/нуклон;  $k_B = 1,6 \cdot 10^{-12}$  Эрг/эВ — постоянная Больцмана;  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с — скорость света.

Граница применимости формул (1)

$$Z > 36, \quad \gamma \leq 1,1, \quad \text{т. е. } E \leq 93,15 \text{ МэВ/нуклон.} \quad (2)$$

Для аппроксимации в область больших энергий, т.е.  $E > 93,13$  МэВ/нуклон, был использован формализм [5], а именно:

$$\sigma_{q \rightarrow q-1, Z_T} = c_0 + (c_1 + c_2 e^{c_3 q}) (c_4 + c_5 e^{c_6 Z_T}) e^{c_7 E}, \quad (3)$$

$$\sigma_{q \rightarrow q+1, Z_T} = \tilde{\sigma}_{q \rightarrow q+1, Z_T} \left( \frac{\tilde{E}}{E} \right)^{c_1 + c_2 e^{c_3 Z_T}},$$

здесь  $\tilde{\sigma}_{q \rightarrow q+1, Z_T}$  и  $\tilde{E}$  — сечение потери по формуле Франзке (1) и энергия, при которой достигается хорошее согласие с экспериментом;  $c_0, \dots, c_7$  — эмпирические параметры [5].

В работах [3, 4] суммарное сечение процесса взаимодействия  $\sigma_{\Sigma, Z_T}$  бралось в виде суммы сечений захвата и потери электронов атомными оболочками ионов:

$$\sigma_{\Sigma, Z_T} = \sigma_{q \rightarrow q-1, Z_T} + \sigma_{q \rightarrow q+1, Z_T}. \quad (4)$$

В формуле (4) принято во внимание условие (2) для формул (1), а для энергий  $E > 93,13$  МэВ/нуклон при расчете используем формулы (3). Размерность сечения по формулам (1), (3) и (4) — см<sup>2</sup>/атом.

Таблица 2. Эмпирика и эксперимент для ионов  $^{238}\text{U}^{28+}$  на установке ESR [6], сечение потери одного электрона  $\times 10^{-18}$  см<sup>2</sup>/атом, теоретическая оценка (1)

Газ	$Z_T$	$E$ , МэВ/нуклон	Эксперимент	Теория	Теория/эксперимент
H <sub>2</sub>	2	3,5	1,62	5,07	3,13
		6,5	1,14	3,97	3,48
		10	1,2±0,064	3,33	2,78
		20	0,5±0,12	2,48	4,96
		40	0,36±0,046	1,82	5,06
		50	0,23±0,036	1,64	7,11
N <sub>2</sub>	14	3,5	22,52	30,83	1,37
		6,5	14,69	26,02	1,77
		20	8,4±2,2	17,21	2,05
		40	3,6±0,11	12,69	3,53
		50	3,5±0,53	11,44	3,27

Таблица 3. Эмпирика и эксперимент для ионов  $^{197}\text{Au}^{52+}$  на установке AGS [7], сечение потери одного электрона  $\times 10^{-18}$  см<sup>2</sup>/атом, теоретическая оценка (3)

Газ	$Z_T$	$E$ , МэВ/нуклон	Эксперимент	Теория	Теория/эксперимент
H <sub>2</sub>	2	100	0,031±0,003	0,14	4,52
		380	0,015±0,002	0,047	3,13
N <sub>2</sub>	14	100	0,69	3,16	4,58
		380	0,31	2,05	6,61

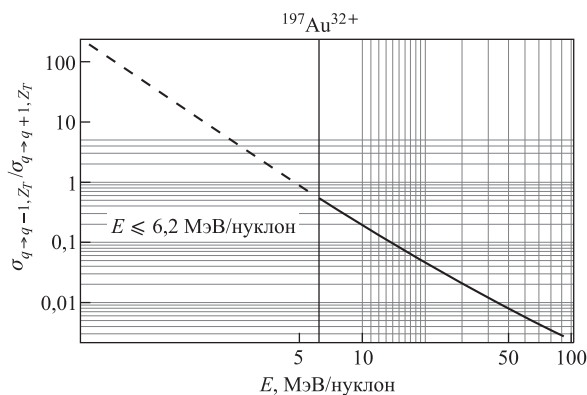


Рис. 1. Отношение  $\sigma_{q \rightarrow q-1, Z_T} / \sigma_{q \rightarrow q+1, Z_T}$  в зависимости от энергии на основе формул (1) и условия (2) для ионов  $^{197}\text{Au}^{32+}$

В табл. 2 дано сравнение расчета по формулам (1) и (3) с экспериментальными данными для ионов  $^{238}\text{U}^{28+}$  на установке ESR [6], а в табл. 3 — для ионов  $^{197}\text{Au}^{52+}$  на установке AGS [7].

На рис. 1 показано, что процесс потери электрона преобладает при энергии  $E > 6,2$  МэВ/нуклон по сравнению с процессом захвата электрона. Этот факт будет использован ниже для расчета потерь пучка ионов  $\text{Au}^{32+}$ .

#### 4. РАБОЧИЙ ЦИКЛ БУСТЕРА

Длительность цикла работы бустера не должна превышать длительность цикла работы нуклотрона и составляет 3 с. Цикл работы бустера состоит из четырех частей:

- 1) адиабатический захват на фиксированной частоте ВЧ-питания на плато магнитного поля;
- 2) ускорение ионов на 4-й гармонике частоты обращения до 100 МэВ/нуклон и разгруппировка, выключение ВЧ-системы;
- 3) электронное охлаждение и группировка пучка на 1-й гармонике частоты обращения;
- 4) ускорение ионов на 1-й гармонике частоты обращения до энергии порядка 600 МэВ/нуклон.

На рис. 2 представлена диаграмма рабочего цикла бустера и рост энергии пучка ионов.

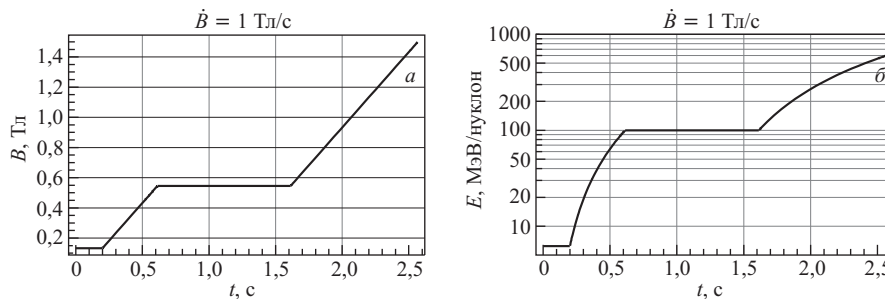


Рис. 2. Диаграмма рабочего цикла бустера (а) и рост энергии пучка ионов  $^{197}\text{Au}^{32+}$  в бустере (б)

## 5. РАСЧЕТ ПОТЕРИ ПУЧКА

Общая формула для коэффициента потерь ( $F_{\text{эфф}}$ ) имеет вид

$$F_{\text{эфф}} = 100 \% \cdot (1 - D_{\text{эфф}}), \quad (5)$$

$$\ln D_{\text{эфф}} = - \int_0^T \frac{dt}{\tau_{\text{эфф}}}, \quad \text{где } \tau_{\text{эфф}} = \sum_{\alpha} \frac{1}{\sigma_{\Sigma, \alpha} \beta c n_{\alpha, \text{эфф}}}.$$

Здесь  $D_{\text{эфф}}$  — эффективный коэффициент передачи;  $\sigma_{\Sigma, \alpha}$  — полное сечение перезарядки на частицах остаточного газа сорта  $\alpha$  по формуле (4) в  $\text{см}^2$ ;  $n_{\alpha, \text{эфф}}$  — эффективная концентрация частиц остаточного газа сорта  $\alpha$  в  $\text{см}^{-3}$ ;  $\beta c$  — относительная скорость ионов пучка;  $T$  — длительность цикла в секундах.

Для расчета  $n_{\alpha, \text{эфф}}$  по формуле (5) использовалась формула

$$n_{\alpha, \text{эфф}} = \frac{L_{\text{хол}} \cdot n_{\alpha, \text{хол}} + L_{\text{тепл}} \cdot n_{\alpha, \text{тепл}}}{L}, \quad (6)$$

$$\frac{n_{\alpha, \text{хол}}}{n_{\alpha, \text{тепл}}} = \sqrt{\frac{T_{\text{тепл}}}{T_{\text{хол}}}},$$

где  $L_{\text{хол}}$ ,  $L_{\text{тепл}}$  — полные эффективные длины «холодного», «теплого» участков бустера соответственно;  $L$  — периметр бустера (см. табл. 1). Кроме того, концентрация (давление) на «теплом» участке рассчитывалась в соответствии с формулой Кнудсена. Во втором выражении (6)  $T_{\text{хол}}$  — температура на «холодном»  $\sim 10$  К,  $T_{\text{тепл}}$  — температура на «теплом»  $\sim 300$  К участках соответственно.

На рис. 3 приведен график эффективных потерь (5) за один рабочий цикл для выбранных параметров бустера из табл. 1.

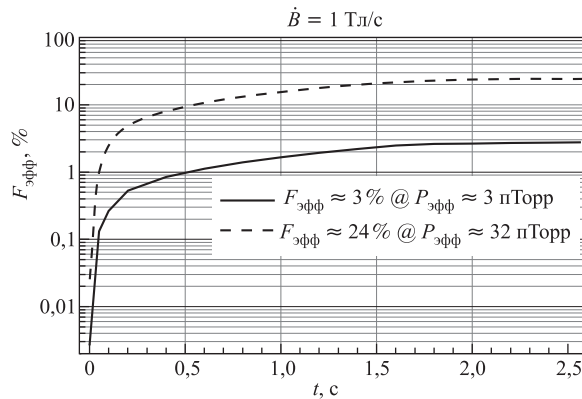


Рис. 3. Сравнение зависимости коэффициента потерь пучка ионов  $^{197}\text{Au}^{32+}$  от времени при  $P_{\text{эфф}} \approx 3$  пТорр и  $P_{\text{эфф}} \approx 32$  пТорр

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные табл. 2 и 3, а также анализ графика рис. 1 позволяет сделать следующие выводы:

1) формулы (1) — Франзке [4], а также формулы (3) — Смолякова [5] дают завышение для сечений перезарядки, т. е. реальные потери будут намного меньше, так как сечения (1) и (3) заметно завышены;

2) с ростом энергии пучка ионов  $^{197}\text{Au}^{32+}$  процесс потери электрона преобладает при энергии  $E > 6,2$  МэВ/нуклон по сравнению с процессом захвата электрона, поэтому при расчете потерь пучка возможно пренебрежение процессом захвата.

При выбранных параметрах бустера нуклотрона, а также для рабочего цикла бустера в соответствии с формулой (5) потери пучка  $^{197}\text{Au}^{32+}$  за один рабочий цикл будут составлять величину порядка 24%, при давлении  $P_{\text{хол}} = 10$  пТорр на «холодных» и  $P_{\text{тепл}} = 100$  пТорр на «теплых» участках, это соответствует величине эффективного давления —  $P_{\text{эфф}} \approx 32$  пТорр. Парциальные составы остаточного газа на «теплых» и «холодных» участках принимались одинаковыми, а именно, состав из 100 %-й фракции молекулярного водорода  $\text{H}_2$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Concept of NICA Collider. Dubna, 2010.
2. Omet C. et al. // New J. Phys. 2006. V. 8. P. 284.
3. Mahner E. CERN LHC-VAC/EM Vacuum Technical Note 2004-04. 2002.
4. Franzke B. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1981. V. NS-28, No. 3. P. 2116–2118.
5. Smolyakov A., Spiller P. ACC-note Internal-2006-001. DOC-2006-Jul-51-1.
6. DuBois R. D. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 2007. V. 261, Iss. 1–2. P. 230–233.
7. Feinberg B. et al. // Phys. Rev. A. 1993. V. 47. P. 2370–2373.