

Вакуумные условия и время жизни пучка однозарядных ионов гелия Бустера NICA (Первый сеанс)

А. В. Бутенко⁺, А. Р. Галимов⁺, И. Н. Мешков^{+*1)}, Е. М. Сыресин^{+°}, И. Ю. Толстихина[×], А. В. Тузиков⁺,
А. В. Филиппов⁺, Г. Г. Ходжибагиан⁺, В. П. Шевелько[×]

⁺Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

^{*}Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 С.-Петербург, Россия

[×]Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

[°]Государственный университет “Дубна”, 141980 Дубна, Россия

Поступила в редакцию 31 марта 2021 г.

После переработки 16 мая 2021 г.

Принята к публикации 16 мая 2021 г.

Приведены результаты первого сеанса (декабрь 2020 г.) по вводу в действие Бустера – нового сверхпроводящего синхротрона, построенного в Объединенном институте ядерных исследований: анализ вакуумных условий и измерений времени жизни пучка однозарядных ионов гелия при энергии инжекции 3.2 МэВ/н, и демонстрация ускорения ионов до энергии 100 МэВ/н. Измеренная величина времени жизни пучка $\tau_{\text{exp}} = (1.32 \pm 0.06)$ с сравнивается с теоретическим расчетом $\tau_{\text{theor}} = (1.74 \pm 0.50)$ с, полученным с помощью оригинальных компьютерных программ. Представлены результаты первого включения системы электронного охлаждения.

DOI: 10.31857/S1234567821120028

1. Введение. В Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина Объединенного института ядерных исследований осуществляется проект Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA), являющийся одним из четырех национальных Мегапроектов. Первой и главной целью проекта является поиск и исследование новых состояний кварк-глюонной материи и фазовых превращений между ними в экстремальных условиях высоких температур и максимально достижимых в лабораторных условиях барионных плотностей. В естественных условиях такая материя, возможно, существовала на разных стадиях эволюции Вселенной и существует в недрах нейтронных звезд, и может быть получена в лабораторных условиях в результате соударений релятивистских тяжелых ионов на Коллайдере создающегося ускорительного комплекса NICA [1, 2].

Первым циклическим ускорителем в цепочке трех синхротронов комплекса NICA является Бустер – новый сверхпроводящий (СП) протонный синхротрон, предназначенный для накопления и ускорения ионов от энергии инжекции 3.2 МэВ/н до энергии около

600 МэВ/н и их последующей инжекции в синхротрон Нуклотрон.

В первом ускорительном сеансе Бустера проверялась работоспособность всех его систем – магнитной отклоняющей и фокусирующей, ускоряющей высокочастотной (ВЧ), системы электронного охлаждения (СЭО), и других. Среди них одной из важнейших является вакуумная система пучковой камеры, тестирование которой производится на конечной стадии измерением времени жизни пучка, циркулирующего в синхротроне. В данном случае таким был пучок однократно ионизованных ионов гелия (He^{1+}), ускоренных в Линейном Ускорителе Тяжелых Ионов (ЛУТИ) до энергии инжекции 3.2 МэВ/н. Этот ион был выбран из-за отсутствия спектра “примесей”: “моно пучок”, удобный для измерения эффективности его транспортировки от инжектора до синхротрона. Источник таких ионов позволял получить пучок с высокой интенсивностью и стабильными параметрами.

2. Распределение давления и состав остаточного газа в вакуумной камере Бустера. Пучковая камера Бустера (рис. 1) разделена затворами с металлическими уплотнениями на “теплые” прямолинейные промежутки (ПП), находящиеся при

¹⁾e-mail: meshkov@jinr.ru

комнатной температуре, и “холодные” квадранты (Кв.), температура которых варьируется в диапазоне от 4.2 до 77.4 °К.

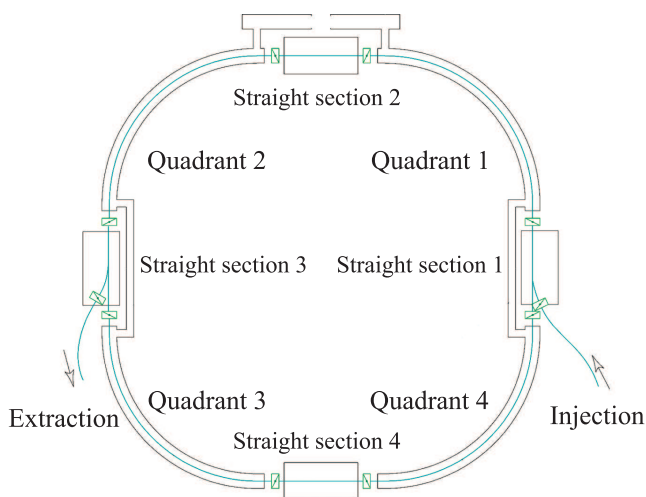


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема вакуумных объемов пучковой камеры Бустера

Перед началом сеанса с целью достижения рабочего давления и оптимального состава остаточного газа, “теплые” ПП предварительно прогревались [3] до температуры 250 °С в течение 48 ч. Рабочее давление достигалось магниторазрядными насосами в комбинации с распыляемыми или нераспыляемыми геттерными.

Измерение давления в арках производилось датчиками с холодным катодом, расположенными на постах откачки при комнатной температуре и соединенными с пучковой камерой через патрубок Ду 100 мм. Расстояние от холодных поверхностей до места установки датчика около 0.5 м. Состав остаточного газа в точке измерения давления не контролировался. Результаты измерений на стенде при аналогичных температурных и вакуумных условиях дают состав – 90 % H₂ и 10 % по остальным газам.

В отсеченных “теплых” ПП после прогрева давление было получено на уровне $(0.2 \div 2.0) \cdot 10^{-8}$ Па. Измерение давления производилось датчиками с холодным катодом, откалиброванными относительно друг друга и установленными непосредственно на элементах пучковой камеры.

Распределение давления по кольцу Бустера при “охлажденной” СП магнитно-криостатной системе [3] измерялось как до начала работы с пучком (рис. 2а), так и в процессе работы с ним (рис. 2б). В первом случае, вакуумные затворы, разделяющие единый вакуумный объем на “теплые” и “холодные” участки, были закрыты до 17.12.2020 г., и среднее давле-

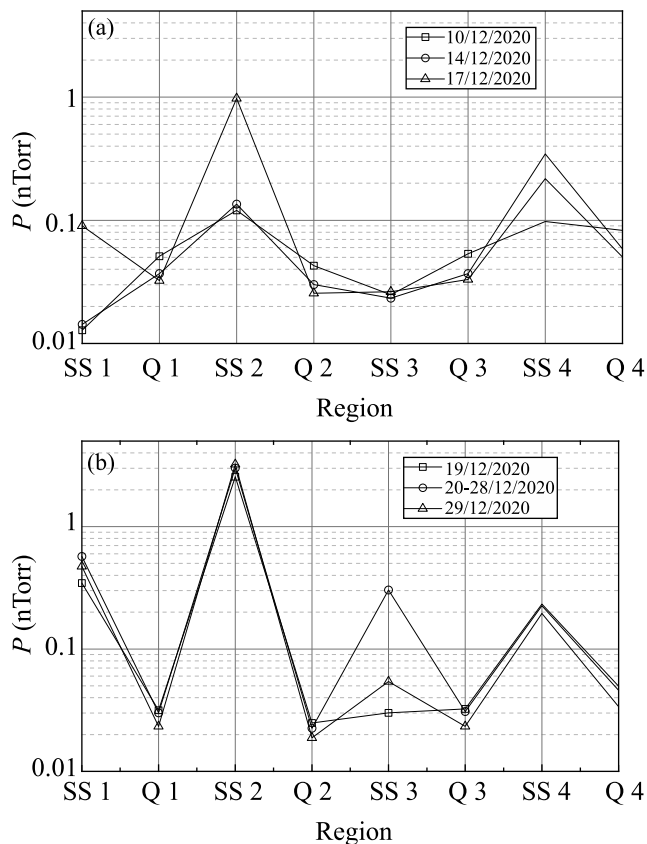


Рис. 2. Распределение давления по кольцу Бустера: (а) – до начала работы с пучком; (б) – в период работы с пучком. Здесь приняты обозначения участков, в которых расположены датчики давления: ПП 1 (SS 1) – участок инжекции с электростатическим септумом. Кв. 1 (Q 1) – арка 1, ПП 2 (SS 2) – участок с ускоряющей станцией; Кв. 2 (Q 2) – арка 2, ПП 3 (SS 3) – участок вывода пучка в Нуклотрон; Кв. 3 (Q 3) – арка 3, ПП 4 (SS 4) – участок с СЭО; Кв. 4 (Q 4) – арка 4. Масштаб по оси абсцисс произвольный

ние по кольцу Бустера, рассчитанное с учетом длин “теплых” и “холодных” участков, составляло около $8 \cdot 10^{-9}$ Па (0.06 нТорр). Во втором случае (работа с пучком, вакуумные затворы открыты) среднее давление выросло до $1.9 \cdot 10^{-8}$ Па (0.14 нТорр). При открытии вакуумных затворов на участках ПП 1, ПП 2 и ПП 3 открылись течи из атмосферы в объем пучковой камеры, локализованные с помощью гелиевого течеискателя.

Для определения состава остаточного газа (рис. 3) в ПП 3 был установлен анализатор остаточного газа – квадрупольный масс-спектрометр с диапазоном измеряемых масс до 100 а.е.м.

В составе остаточного газа в ПП 3 основные пики соответствуют массам 2, 14 и 28 а.е.м. Для чистых (с низким содержанием углеводородов) прогретых “теп-

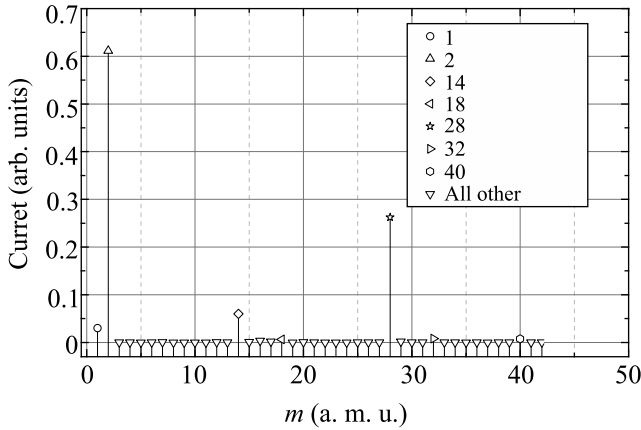


Рис. 3. Масс-спектр состава остаточного газа в ПП 3 (SS 3) вакуумной камеры Бустера. Цифры в легенде показывают значения масс основных компонент остаточного газа в а.е.м.

лых”, но не отоженных систем характерно преобладание в составе остаточного газа молекулярного водорода (пики 1 и 2 а.е.м.). Присутствие атмосферных течей приводит к возникновению пика 28 а.е.м. (N_2^+ и/или CO^+). Практика работы с СП кольцевыми укорителями показывает, что давление остаточного газа в пучковых камерах “холодных” участков, при отсутствии поступления гелия в пучковую камеру, определяется молекулярным водородом, так как все остальные газы, кроме таких, как аргон или неон, сорбируются на наиболее “холодных” участках камеры [3].

Возможные варианты состава остаточного газа в “теплом” ПП 3 Бустера (табл. 1) отличаются наличием компонент H_2 или He , неразличимых для доступных масс-спектрометров. Вероятные причины появления пиков 14 и 28 а.е.м. обсуждаются в [3].

Таблица 1. Возможные составы остаточного газа в “теплом” ПП 3 Бустера

#	Масс-спектр	Возможный источник
I	3 % H, 67 % H_2 , 6 % N, 24 % N_2	Атмосферная течь
II	3 % H, 67 % He, 6 % N, 24 % N_2	Гелиевая и азотная течи

3. Измерение времени жизни ионов He^{1+} , циркулирующих в Бустере. Значения времени жизни τ_{exp} пучка ионов He^{1+} при энергии 3.2 МэВ/н определялись для двух независимых измерений зависимости тока пучка от времени, измеренной с помощью параметрического трансформатора тока пучка (ПТТ) и с хорошей точностью аппроксимировавшейся экспоненциальной функцией $e^{-t/\tau_{exp}}$. По результатам двух измерений (рис. 4) получены значе-

ния $\tau_{exp1} = 1.28$ с (набор точек 1) и $\tau_{exp2} = 1.36$ с (набор точек 2), что дает среднее значение:

$$\langle \tau_{exp} \rangle = (1.32 \pm 0.06) \text{ с.} \quad (1)$$

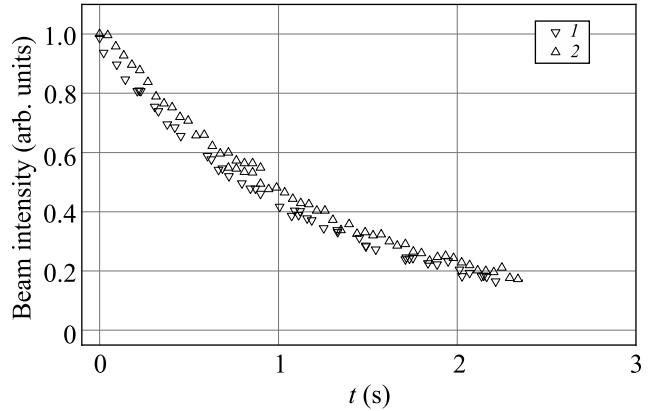


Рис. 4. Зависимость сигнала ПТТ от времени при циркуляции ионов He^{1+} на плато магнитного поля при энергии инжекции 3.2 МэВ/н

Такие же измерения времени жизни пучка проводились при включенной СЭО [3] и различных значениях энергии электронов. При приближении значения этой энергии к оптимальному (соответствующему равенству скоростей электронов и охлаждаемых ионов) наблюдалось уменьшение времени жизни ионов, что указывает на работоспособность СЭО. Более точные и детальные измерения планируется провести в следующем сеансе.

Интересно отметить, что такой же эффект уменьшения времени жизни пучка наблюдался в первых экспериментах по электронному охлаждению на накопителе НАП-М [4] (ИЯФ СО АН СССР, 1974 г.).

4. Результаты теоретических расчетов и сравнение их с экспериментом. Расчеты времени жизни пучка ионов He^{1+} проводились в предположении, что потери интенсивности пучка вызваны только взаимодействием ионов с атомами и молекулами остаточного газа в вакуумной камере Бустера. Поскольку Бустер имеет “теплые” и “холодные” участки вакуумной камеры, для расчета времени жизни τ_{theor} использовалась формула

$$\frac{1}{\tau_{theor}} = \sum_{\alpha} \sigma_{\alpha} \beta c n_{\alpha} + \sum_{\alpha'} \sigma_{\alpha'} \beta c n_{\alpha'}. \quad (2)$$

Здесь $\beta = v/c$ – релятивистский фактор, v – скорость ионов пучка, c – скорость света, σ_{α} и $\sigma_{\alpha'}$ – сумма сечений ионизации (обдирки) и перезарядки ионов He^{1+} , n_{α} и $n_{\alpha'}$ – концентрации частиц остаточного газа, α и α' – сорта остаточного газа в “теп-

лой” (L_{warm}) и “холодной” (L_{cold}) частях вакуумной камеры Бустера соответственно:

$$n_{\alpha} = \frac{L_{\text{warm}}}{L} n_{\alpha, \text{warm}}, \quad n_{\alpha'} = \frac{L_{\text{cold}}}{L} n_{\alpha', \text{cold}}, \quad (3)$$

где концентрации $n_{\alpha, \text{warm}}$, $n_{\alpha', \text{cold}}$ рассчитывались по формулам, учитывающим эффект Кнудсена [5] по измеренным средним давлениям (рис. 2b), $L_{\text{warm}} = 24$ м и $L_{\text{cold}} = 187$ м – длины “теплого” и “холодного” участков вакуумной камеры Бустера с периметром $L = 211$ м.

Сечения ионизации и перезарядки ионов He^{1+} вычислялись по программам RICODE-M и CAPTURE, описанным в работах [6, 7] и [8] соответственно. В программе RICODE-M вычисляются сечения ионизации (обдирки) атомов и ионов в релятивистском приближении Борна [6, 7] с учетом магнитного взаимодействия между сталкивающимися частицами и использовании релятивистских волновых функций электронов в дискретном и непрерывном спектрах. Программа CAPTURE основана на использовании приближения Бринкмана–Крамерса с учетом нормировки сечений перезарядки. Сечения взаимодействия с молекулами определялись согласно правилу аддитивности Брэгга, т.е. для молекул полагалось $\sigma(\text{H}_2) = 2\sigma(\text{H})$ и $\sigma(\text{N})_2 = 2\sigma(\text{N})$.

Расчет сечений ионизации и перезарядки ионов He^{1+} для мишеней H, He и N в широкой области энергий $E = 0.1 \div 100$ МэВ/н показал, что сечения хорошо согласуются с экспериментальными данными и расчетами других авторов, и сечения ионизации на много порядков превосходят сечения перезарядки. Точность расчета сечений при энергии $E > 1$ МэВ/н составляет $20 \div 30$ %. Вычисленные сечения при $E = 3.2$ МэВ/н приведены в табл. 2, а в табл. 3 – времена жизни пучка при различных параметрах остаточного газа Бустера и предположении однокомпонентного состава остаточного газа в “холодных” арках, состоящего из молекулярного водорода H_2 . Таким образом, основным процессом изменения зарядового состояния ионов He^{1+} в Бустере является ионизация с образованием альфа-частиц, а вклад процессов перезарядки пренебрежимо мал. Из таблицы 3 видно, что при фиксированной температуре “холодной” части T_{cold} времена жизни для составов газа I и II практически одинаковы, а при разных значениях $T_{\text{cold}} = 4.2$ и 10 °К отличаются в 1.8 раз.

Если принять температуру в “холодной” части Бустера равной температуре жидкого гелия $T_{\text{cold}} = 4.2$ °К, то среднее, вычисленное с точностью 30 %

Таблица 2. Значения сечений ионизации и перезарядки на атомах и молекулах остаточного газа, вычисленные для ионов He^{1+} при энергии 3.2 МэВ/н

Атом, молекула	Сечения ионизации, см ²	Сечения перезарядки, см ²
H	$1.60 \cdot 10^{-18}$	$8.21 \cdot 10^{-25}$
H ₂	$3.20 \cdot 10^{-18}$	$1.64 \cdot 10^{-25}$
He	$2.78 \cdot 10^{-18}$	$6.82 \cdot 10^{-24}$
N	$2.10 \cdot 10^{-17}$	$1.22 \cdot 10^{-21}$
N ₂	$4.20 \cdot 10^{-17}$	$2.44 \cdot 10^{-21}$

время жизни пучка совпадает с экспериментальным значением (1):

$$\tau_{\text{theor}} = (1.74 \pm 0.50) \text{ с.} \quad (4)$$

Причиной сокращения времени жизни частиц, циркулирующих в кольце, могло быть также возмущение их динамики полем пространственного заряда ионного пучка. Однако, как показывают оценки, сдвиги частот бетатронных колебаний под действием этого поля (Ласлеттовский сдвиг частот) на энергии инжекции и при интенсивности пучка $3 \cdot 10^{10}$ ионов He^{1+} не превышают $\Delta Q = 0.02$, что означает практически полное отсутствие влияния пространственного заряда, что подтверждается также фитированием кривых рис. 4 экспонентами с постоянным показателем.

Закключение. Выполнены первые эксперименты по измерению времени жизни пучка ионов He^{1+} при энергии $E = 3.2$ МэВ/н в Бустере нового национального проекта NICA: $\langle \tau_{\text{exp}} \rangle = (1.32 \pm 0.06) \text{ с.}$ При температуре в “холодной” части вакуумной камеры, равной температуре жидкого гелия $T_{\text{cold}} = 4.2$ °К, теоретическое значение согласуется с экспериментальной величиной: $\tau_{\text{theor}} = (1.74 \pm 0.50) \text{ с.}$ Значения времени жизни пучка ионов He^{1+} , рассчитанные для постоянной температуры T_{cold} для обоих вариантов остаточного газа, близки друг к другу.

Основным процессом, определяющим время жизни ионного пучка, является ионизация ионов He^{1+} при столкновениях с атомами и молекулами остаточного газа. Влияние ошибок фокусирующей системы Бустера и пространственного заряда пучка пренебрежимо мало, что является наиболее существенным результатом первого сеанса.

В заключительной части сеанса было проведено успешное ускорение ионов до энергии 100 МэВ/н [3], что показало возможность работы Бустера для полученного значения “вакуумного” времени жизни ионов при энергии инжекции.

Таблица 3. Значения времени жизни τ пучка He^{1+} , вычисленные по формуле (2) для газовых составов I и II (табл. 1) для значений температуры, давления и плотности “теплой” и “холодной” частей Бустера

T_{warm} , К	P_{warm} , нПа/нТорр	n_{warm} , 10^7 см^{-3}	T_{cold} , °К	P_{cold} , нТорр	n_{cold} , 10^7 см^{-3}	$\tau(\text{I})$, с	$\tau(\text{II})$, с
300	135/1.01	3.25	10	0.03	2.89	3.07	3.10
300	135/1.01	3.25	4.2	0.03	6.43	1.74	1.75

- G. Trubnikov, A. Butenko, E. Donets et al. (Collaboration), *Project of The Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA) at JINR, Proc. European Part. Accel. Conf. EPAC08*, Genoa, Italy (2008).
- V. D. Kekelidze, R. Lednicky, V. A. Matveev, I. N. Meshkov, A. S. Sorin, and G. V. Trubnikov, *The European Physical Journal A – Hadrons and Nuclei* **52**(8), 211 (2016).
- Итоги первого ускорительного сеанса Бустера Нуклотрона. Препринт ОИЯИ, издательский отдел ОИЯИ, Дубна (2021), (в печати).
- Г. И. Будкер, Я. С. Дербенев, Н. С. Диканский, В. И. Куделайнен, И. Н. Мешков, В. В. Пархомчук, Д. В. Пестриков, А. Н. Скринский, Б. Н. Сухина, *Атомная энергия* **40**(1), 49 (1976).
- Р. Хэфер, *Криовакуумная техника*, Энергоатомиздат, М. (1983).
- И. Ю. Толстикова, В. П. Шевелько, *Письма в ЖЭТФ* **94**, 2 (2011) [I. Yu. Tolstikhina, V. P. Shevelko, *JETP Lett.* **94**, 152 (2011)].
- И. Ю. Толстикова, И. И. Тупицын, С. Н. Андреев, В. П. Шевелько, *ЖЭТФ* **146**, 5 (2014) [I. Yu. Tolstikhina, I. I. Tupitsyn, S. N. Andreev, and V. P. Shevelko, *JETP* **119**, 1 (2014)].
- V. P. Shevelko, O. Rosmej, H. Tawara, and I. Yu. Tolstikhina, *J. Phys. B: Atom. Mol. Opt. Phys.* **37**, 201 (2004).