

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В БУСТЕР УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

*В. И. Волков, И. Н. Мешков, В. А. Михайлов,
Г. В. Трубников, А. В. Тузиков¹, А. А. Фатеев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В статье рассматривается проект системы инжекции пучков тяжелых ионов в бустер ускорительного комплекса NICA, создаваемого в ОИЯИ (Дубна). Предлагаемая система позволяет осуществлять многовариантную инжекцию для накопления в бустере пучка требуемой интенсивности. В докладе представлены основные методы однооборотной, многооборотной и многократной инжекции в бустер. Приводятся результаты моделирования динамики пучка при инжекции.

Project of system of heavy ion beam injection into Booster synchrotron of NICA accelerator complex developed at JINR (Dubna) is considered. The proposed system provides multivariant injection for accumulation of beams with required intensity. Main methods of beam injection into Booster are described. These are single-turn, multiturn and multiple injection ones. Results of beam dynamics simulations are presented.

PACS: 29.20.db; 29.27.Ac

ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта NICA [1] в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) ведутся работы по созданию нового ускорительного комплекса на базе существующего в Лаборатории физики высоких энергий. Основной установкой комплекса NICA будет коллайдер, представляющий собой два накопительных кольца с двумя точками встречи. На первом этапе проекта коллайдер предполагается использовать для проведения экспериментов на встречных пучках тяжелых ионов. Инжекционная цепочка коллайдера в тяжелоионном режиме работы будет включать ионный источник «Крион», тяжелоионный линейный ускоритель NPLac, сверхпроводящие синхротроны бустер и нуклотрон, а также каналы транспортировки пучка.

¹E-mail: tuzikov@jinr.ru

Наиболее важными параметрами пучка тяжелых ионов в коллайдере в режиме столкновений являются его продольный и поперечный эмиттансы и интенсивность, которые в совокупности определяют светимость коллайдера и время жизни пучка в нем. Проектная светимость коллайдера ($10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) и приемлемое время жизни пучка (порядка нескольких часов) могут быть достигнуты с помощью систем электронного и стохастического охлаждения бустера и коллайдера [2], но только при условии, что интенсивности инжектируемого в коллайдер пучка достаточно для накопления требуемого числа ионов. Существует несколько факторов риска, которые могут привести к значительным потерям ионов при низких и средних уровнях энергий, и тогда необходимо либо увеличивать длительность накопления ионов в коллайдере, либо искать пути уменьшения потерь ионов в инжекционной цепочке. Второй подход представляется более эффективным. По оценкам, основные потери ионов будут наблюдаться при энергиях до 5 МэВ/нуклон, т.е. на временном интервале от вылета ионов из источника «Крион» до начального этапа ускорения в бустере. Тогда увеличение интенсивности пучка, инжектируемого в коллайдер, равнозначно увеличению интенсивности пучка, ускоренного в бустере, которое может быть достигнуто различными способами накопления ионов. В связи с этим предлагается концепция многовариантной инжекции, которая позволит в случае необходимости увеличивать интенсивность пучка. В рамках этой концепции решаются следующие задачи: 1) определение факторов риска, приводящих к уменьшению интенсивности пучка; 2) определение способов подавления этих факторов (соответствующих методов инжекции пучка); 3) проектирование системы инжекции пучка в бустер.

1. ФАКТОРЫ РИСКА И СПОСОБЫ ИХ ПОДАВЛЕНИЯ

На этапе прохождения пучков ионов в бустере и его инжекционной цепочке имеется несколько факторов риска, потенциально приводящих к значительному уменьшению интенсивности пучка на выходе из бустера. Три из них представляются наиболее опасными: 1) потери ионов в бустере при прохождении резонансов вследствие больших сдвигов частот бетатронных колебаний; 2) потери ионов в канале транспортировки пучков низких энергий и в ускорителе НИЛас вследствие эффектов пространственного заряда; 3) ограниченность тока пучка, выведенного из ионного источника «Крион».

Первые два фактора, приводящие к потерям ионов, связаны с эффектами собственных электромагнитных полей пучков. В синхротронах наличие собственного пространственного заряда пучка приводит к сдвигам частот бетатронных колебаний ускоряемых частиц. Для бустера с проектными частотами $Q_x = 4,8$ и $Q_y = 4,85$ возможно пересечение бетатронных резонансов третьего порядка $3Q_{x,y} = 14$, что приведет к резонансной раскачке колебаний ионов и их потерям.

Вторым фактором, уменьшающим интенсивность пучка, являются потери ионов в канале транспортировки пучков низких энергий и в ускорителе НИЛас. Эти потери обусловлены ростом поперечного эмиттанса пучка, вызванного собственным пространственным зарядом. Ситуация усугубляется тем, что пучок ионов из источника «Крион» имеет широкий зарядовый спектр — это многократно увеличивает данный эффект.

Эффекты пространственного заряда могут быть ослаблены путем уменьшения продольной линейной плотности заряда в пучке. Это достигается двумя способами: увели-

чением поперечных размеров или длины пучка. Для подавления потерь ионов при бетатронных резонансах в бустере подходящим является увеличение поперечных размеров пучка, в то время как для подавления потерь в канале транспортировки и в линейном ускорителе потребуется увеличение длины, т.е. длительности вывода ионов из источника «Крион».

Третьим фактором риска является значение максимального тока ионного пучка, выведенного из источника. В случае его недостаточности необходимо многократное повторение импульсов ионов с максимально возможной частотой и их накопление в бустере.

2. МНОГОВАРИАНТНАЯ ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА В БУСТЕР

Для инъекции пучков заряженных частиц в синхротроны и накопительные кольца используются различные методы инъекции. Эти методы могут быть классифицированы по двум признакам: 1) число импульсов инъекции частиц; 2) длительность импульсов инъекции. По первому признаку методы инъекции делятся на однократные и многократные, по второму — на однооборотные и многооборотные.

Как было сказано ранее, предлагается применять различные методы инъекции ионного пучка в бустер в качестве меры увеличения его интенсивности. Наиболее подходящие методы могут быть определены непосредственно из тех способов подавления факторов уменьшения интенсивности, которые указаны в предыдущем разделе. Но для начала следует выбрать метод инъекции пучка для проектного случая, т.е. когда рассмотренные факторы риска не оказывают значительного влияния на интенсивность пучка в коллайдере. Так как наиболее простым является метод однократной однооборотной инъекции, он и предлагается по умолчанию.

Этот же метод инъекции может быть использован для подавления потерь ионов вследствие сдвигов частот бетатронных колебаний. Увеличение поперечных размеров пучка достигается ростом поперечных эмиттансов, вызванных или смещением пучка при инъекции относительно замкнутой орбиты, или несогласованием бетатронных функций инжектируемого пучка со структурными функциями бустера.

Для уменьшения потерь ионов низких энергий вследствие эффектов пространственного заряда предлагается применять метод многооборотной инъекции. Увеличение длительности вывода ионов из источника «Крион» приводит соответственно к удлинению импульса инъекции ионов в бустер и к заполнению ионами различных областей фазового пространства при различных оборотах инъекции.

Для подавления третьего фактора риска необходимо использовать метод многократной инъекции. В этом методе ионы заполняют различные области фазового пространства в зависимости от номера импульса инъекции. Также в промежутках между импульсами инъекции возможно дополнительное воздействие на накапливаемый пучок, в частности его охлаждение.

Наиболее предпочтительным является накопление ионов в горизонтальной фазовой плоскости бустера. Накопление в вертикальной или продольной фазовой плоскости нецелесообразно ввиду таких фактов, как расположение линейного ускорителя НИЛас и бустера в одной горизонтальной плоскости и близкая к нулю дисперсия пучка в прямолинейных промежутках синхротрона.

Соответствующая система инъекции пучка должна иметь традиционный набор устройств: септум для ввода ионов в вакуумную камеру бустера и ударные устройства для посадки пучка на замкнутую орбиту или для создания локального бампа замкнутой орбиты.

3. ПОТЕРИ ИОНОВ ПРИ ИНЖЕКЦИИ И АКСЕПТАНС БУСТЕРА

В качестве дополнительного критерия отбора методов инъекции пучка служит наличие потерь частиц, вызванных использованием рассматриваемого метода. Потери можно условно разделить на систематические (гарантированные особенностями инъекции частиц) и случайные (вызванные ошибками полей и юстировки структурных элементов и устройств системы инъекции синхротрона).

Рассмотрим методы инъекции ионного пучка в бустер с точки зрения потерь, вызванных инъекцией, при этом ограничимся только систематическими потерями. Так как многовариантная инъекция в бустер предлагается как средство увеличения интенсивности пучка на входе в коллайдер, найдем методы инъекции без потерь ионов. Для этого определим требования к методам инъекции, обеспечивающие полное отсутствие систематических потерь.

Для случая накопления ионов в горизонтальной плоскости потери могут быть вызваны следующими факторами: 1) близостью траектории движения инжектируемого (вводимого в синхротрон через устройства системы инъекции) или накапливаемого (циркулирующего в синхротроне в течение инъекции) пучка к апертурным элементам; 2) большими амплитудами бетатронных колебаний; 3) расширением орбит.

Для подавления первого фактора, приводящего к потерям ионов в течение инъекции, требуется «обходить» инжектируемым и накапливаемым пучками элементы апертуры вакуумной камеры: $X_{\text{beam}}(s) - a_{\text{beam}}(s) > X_{\text{aper}}^{\text{inner}}(s)$ и $X_{\text{beam}}(s) + a_{\text{beam}}(s) < X_{\text{aper}}^{\text{outer}}(s)$, где $X_{\text{beam}}(s)$, $a_{\text{beam}}(s)$ — положение и полуразмер пучка; $X_{\text{aper}}^{\text{inner}}(s)$, $X_{\text{aper}}^{\text{outer}}(s)$ — координаты внутренней и внешней стенок вакуумной камеры (элемента апертуры).

Потери ионов вследствие бетатронных колебаний и расширения замкнутых орбит возникают или при превышении максимально допустимой амплитуды бетатронных колебаний, или при выпадении ионов из режима ускорения. Для этих потерь имеется зависимость от значений продольного и поперечных эмиттансов накопленного пучка и рабочего цикла ускоряющей ВЧ-системы бустера. Если рассматривать случай когда при однократной однооборотной инъекции с точной посадкой пучка на замкнутую орбиту и полным согласованием бетатронных и дисперсионных функций (иначе при равенстве эмиттансов инжектируемого и накопленного пучков) потери ионов отсутствуют, то исключается зависимость потерь от вертикального и продольного эмиттансов. Тогда наличие или отсутствие потерь ионов определяется значением только горизонтального эмиттанса накопленного пучка. Следовательно, необходимо определить максимальное значение горизонтального эмиттанса пучка, при котором будут отсутствовать потери для заданного рабочего цикла ускоряющей ВЧ-системы бустера, т.е. требуется удовлетворить условие отсутствия потерь ионов, находящихся внутри сепаратриссы.

Рассмотрим в приближении линейной оптики горизонтальную огибающую пучка с учетом расширения замкнутой орбиты и ее отклонения от оси вакуумной камеры вслед-

ствии ошибок магнитных полей и юстировки структурных элементов бустера. Введем следующие величины: $\varepsilon_{x,100\%}$ — бетатронный 100 %-й эмиттанс, т.е. площадь фазового эллипса, содержащего 100 % ионов пучка с одинаковой энергией; $\frac{\Delta p}{p_{\max}}$ — максимальное импульсное отклонение ионов пучка; $\Delta x_{c.o.}(s)$ — отклонение замкнутой орбиты от оси вакуумной камеры (для ионов с продольным импульсом, равным синхронному). Тогда огибающая пучка может быть записана в следующем виде:

$$a_x(s) = \sqrt{\beta_x(s)\varepsilon_{x,100\%}} + D_x(s)\frac{\Delta p}{p_{\max}} + \Delta x_{c.o.}(s), \quad (1)$$

где $a_x(s)$ — полуразмер пучка; $\beta_x(s)$, $D_x(s)$ — бета-функция и дисперсия соответственно.

Так как огибающая пучка ограничена апертурой вакуумной камеры $r_x(s)$, то из равенства $a_x(s) = r_x(s)$, принимая во внимание (1), находим максимальное допустимое значение бетатронного 100 %-го эмиттанса пучка, т.е. аксептанс бустера:

$$A_x = \min \frac{\left(r_x(s) - D_x(s)\frac{\Delta p}{p_{\max}} - \Delta x_{c.o.}(s) \right)^2}{\beta_x(s)}. \quad (2)$$

Определим необходимые величины для вычисления бетатронного аксептанса бустера. Вакуумная камера бустера имеет эллиптическое сечение с полуосями $r_x(s) = 64$ мм и $r_y(s) = 32$ мм. Проектное отклонение скорректированной замкнутой орбиты от оси камеры не превышает 5 мм. Если предположить, что ошибки полей и юстировки структурных элементов распределены равномерно по периметру бустера, то отклонение замкнутой орбиты может быть записано следующим образом:

$$\Delta x_{c.o.}(s) = \sqrt{\frac{\beta_x(s)}{\beta_{x,\max}}} \Delta x_{c.o.,\max}, \quad (3)$$

где $\beta_{x,\max}$ — максимальное значение бета-функции; $\Delta x_{c.o.,\max}$ — максимальное отклонение замкнутой орбиты.

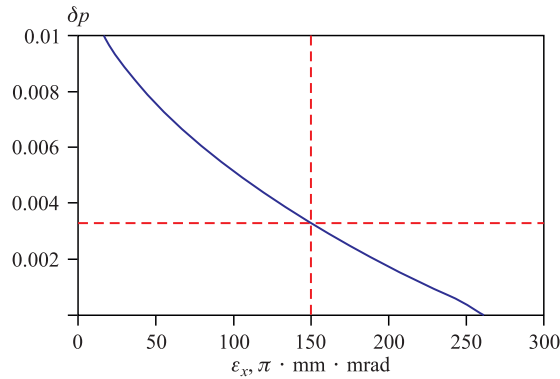


Рис. 1. Зависимость максимального продольного импульсного отклонения δp от горизонтального эмиттанса пучка ε_x

Остальные параметры, такие как рабочий цикл, структурные функции и проектные настройки ускоряющей ВЧ-системы бустера, указаны в [3, 4].

Для общего случая (при произвольном рабочем цикле ВЧ-системы бустера) из формул (2) и (3) находится зависимость бетатронного аксептанса от максимальной полувысоты сепаратриссы, которая имеет вид, показанный на рис. 1. Согласно [4], максимально возможное продольное импульсное отклонение ионов, захваченных в режим ускорения, будет равно $3,3 \cdot 10^{-3}$. Следовательно, горизонтальный бетатронный аксептанс бустера равен $150 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

Таким образом, методы инъекции пучка в бустер должны удовлетворять следующим условиям:

- 1) огибающие инжектируемого и накапливаемого пучков должны «обходить» элементы апертуры вакуумной камеры;
- 2) горизонтальный эмиттанс накопленного пучка не должен превышать $150 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

4. КОНЦЕПЦИЯ ОДНОКРАТНОЙ ОДНОБОРОТНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Однократная однооборотная инъекция является наиболее простым методом инъекции пучков в синхротроны и накопительные кольца. В процессе инъекции с помощью данного метода пучок по горизонтали вводится в вакуумную камеру бустера и сажается на заданную траекторию циркуляции пучка. Посадка инжектируемого пучка производится импульсным ударным устройством, которое отключается до окончания первого оборота инжектированных частиц в ускорителе.

Однократная однооборотная инъекция (как и другие методы инъекции пучка) может быть реализована при различных траекториях ввода инжектируемого и циркуляции накапливаемого (накопленного) пучков. Получаемое бесконечное множество возможных вариантов траекторий может быть разбито по некоторым качественным критериям на конечное число подмножеств, которые назовем схемами инъекции. Помимо траекторий пучков, схемы инъекции можно различать и по иным признакам, например, по значениям оптических функций инжектируемого пучка. Наиболее предпочтительной схемой однократной однооборотной инъекции является схема с точной посадкой инжектируемого пучка на замкнутую орбиту и полным согласованием его оптических функций со структурными функциями принимающего ускорителя. Так как в этом случае горизонтальный эмиттанс накопленного пучка равняется эмиттансу инжектируемого пучка, данная схема выбрана в качестве основной для инъекции ионов в бустер.

В любом ином случае горизонтальный эмиттанс накопленного пучка будет больше эмиттанса инжектируемого пучка вследствие филаментации фазового распределения ионов. В связи с этим для бустера рассматриваются две дополнительные схемы однократной однооборотной инъекции. Первая дополнительная схема отличается от основной схемы инъекции пучка в бустер тем, что инжектируемый пучок не выводится точно на замкнутую орбиту путем уменьшения угла отклонения пучка в импульсном ударном устройстве системы инъекции. Вторая дополнительная схема инъекции отличается от основной тем, что на выходе септума системы инъекции инжектируемый пучок имеет значения бетатронных функций, отличные от согласованных значений при сохранении траектории движения.

Рассмотрим схему инжекции со смещением пучка относительно замкнутой орбиты. Для простоты вычислений будем использовать нормированные фазовые координаты, получаемые линейным преобразованием:

$$X = \frac{x}{\sqrt{\beta}}, \quad X' = \frac{\alpha}{\sqrt{\beta}}x + \sqrt{\beta}x', \quad (4)$$

где x, x' — «обычные» фазовые координаты; α, β — структурные функции, используемые для нормировки.

Пусть после прохождения ударного устройства пучок смещен на ΔX и $\Delta X'$ по координате и углу соответственно. Тогда эмиттанс накопленного пучка после филаментации фазового распределения ионов

$$\varepsilon_{st} = \left(\sqrt{\varepsilon_{inj}} + \sqrt{\Delta X^2 + \Delta X'^2} \right)^2, \quad (5)$$

где ε_{inj} — эмиттанс инжектируемого пучка.

Рассмотрим вторую дополнительную схему с инжекцией несогласованного пучка. Пусть на выходе септума инжектируемый пучок имеет значения горизонтальных бетатронных функций β_{inj} и α_{inj} , в общем случае отличные от значений структурных функций бустера, при этом значения остальных оптических функций и траектория ввода пучка соответствуют основной схеме инжекции. Тогда горизонтальный эмиттанс накопленного пучка после филаментации

$$\varepsilon_{st} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{H+1} + \sqrt{H-1} \right)^2 \varepsilon_{inj}, \quad (6)$$

где $H = \frac{1}{2} (\beta_0 \gamma_{inj} + \beta_{inj} \gamma_0 - 2\alpha_0 \alpha_{inj})$, $\gamma_{inj} = \frac{1 + \alpha_{inj}^2}{\beta_{inj}}$, $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ — значения структурных функций бустера на выходе септума.

5. КОНЦЕПЦИЯ ОДНОКРАТНОЙ МНОГООБОРОТНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Однократная многооборотная инжекция является дополнительным методом инжекции пучка в бустер, который предполагается использовать, как было сказано выше, для уменьшения потерь ионов в инжекционной цепочке бустера от источника «Крион» до канала транспортировки НЛас-бустера. Данный метод заключается в постепенном заполнении горизонтальной фазовой плоскости бустера, при котором инжектированные ионы вследствие когерентных бетатронных колебаний смещаются по фазовой плоскости так, что на выходе септума системы инжекции бустера освобождается место для вновь инжектируемых ионов. Для осуществления такого подхода перед началом инжекции в окрестности септума создается бамп замкнутой орбиты. Ввод ионов продолжается в течение двух-трех оборотов пучка при энергии инжекции.

В результате однократной многооборотной инжекции горизонтальная фазовая плоскость заполняется ионами кусочно, т.е. накопленный пучок представляет собой совокупность непересекающихся фазовых эллипсов (в линейном приближении), взаимо-

расположение которых зависит от фазовых координат на выходе септума как инжектируемого пучка, так и замкнутой орбиты бустера. При этом изменение этих фазовых координат во времени может существенно влиять на заполнение ионами фазовой плоскости. Поскольку поле септума полагается квазистатическим (неизменным в течение инъекции), далее рассматриваются схемы однократной многооборотной инъекции с возможностью изменения только полей в импульсных ударных устройствах системы инъекции.

При условии постоянства полей в ударных устройствах замкнутая орбита бустера в течение всего времени инъекции остается неизменной, и накопление ионов происходит так, как это продемонстрировано на рис. 2. Следует отметить, что двух- и трехоборотная инъекции проводятся одинаково.

Как видно из рис. 2, б, для фиксированного значения $\Delta\mu \equiv 2\pi(1 - \{Q_x\})$ (данное определение справедливо для случая бустера при $\{Q_x\} \geq 0,5$) существует бесконечное множество схем инъекции, определяемых: 1) разностями фазовых координат инжектируемого пучка и замкнутой орбиты на выходе септума ΔX_{inj} , $\Delta X'_{inj}$; 2) бетатронными функциями инжектируемого пучка β_{inj} , α_{inj} . Из этого множества для использования в бустере была найдена оптимальная схема, где критерием оптимальности являлась минимальность горизонтального эмиттанса накопленного пучка после филаментации фазового распределения ε_{st} . Найденная оптимальная схема двух- и трехоборотной инъекции пучка в бустер удовлетворяет следующим условиям:

1) $\beta_{inj} = \beta$, $\alpha_{inj} = \alpha$ — полное согласование инжектируемого пучка со структурными функциями бустера;

$$2) \Delta X_{inj} = \sqrt{\varepsilon_{inj}} + \frac{h_{sep}}{2\sqrt{\beta}}, \Delta X'_{inj} = \frac{\Delta X_{inj}}{\operatorname{tg} \frac{\Delta\mu}{2}}, \quad (7)$$

где h_{sep} — толщина ножа септума на его выходе.

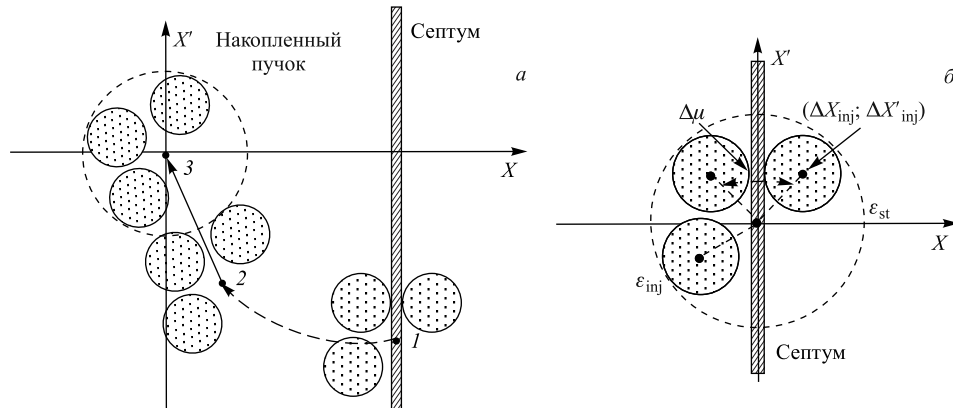


Рис. 2. Однократная трехоборотная инъекция с постоянной замкнутой орбитой: а) фазовые портреты пучка на третьем обороте инъекции; б) накопленный пучок в конце третьего оборота инъекции и после филаментации фазового распределения ионов. Положения пучка: 1 — на выходе септума; 2 — на входе последнего ударного устройства; 3 — на выходе последнего ударного устройства

Горизонтальный эмиттанс пучка, накопленного с помощью указанной схемы однократной многооборотной инъекции, не зависит от длительности (числа оборотов) инъекции:

$$\varepsilon_{st} = \left[\frac{1}{\sin \frac{\Delta\mu}{2}} \left(\sqrt{\varepsilon_{inj}} + \frac{h_{sep}}{2\sqrt{\beta}} \right) + \sqrt{\varepsilon_{inj}} \right]^2. \quad (8)$$

В целях более компактного заполнения ионами горизонтальной фазовой плоскости бустера и тем самым уменьшения эмиттанса пучка после филаментации могут быть применены переменные поля в импульсных ударных устройствах системы инъекции. Для бустера было предложено скачкообразное изменение полей, когда полный период инъекции делится на два временных интервала (равных целому числу оборотов пучка), на границе которых и происходит переход между уровнями полей в ударных устройствах. Такой режим работы импульсных ударных устройств со скачкообразным изменением полей далее будем называть двухступенчатым.

Двухступенчатый режим может быть весьма эффективным при настройках ударных устройств, приводящих к глобальному искажению замкнутой орбиты. В этом случае удобно перейти к рассмотрению преобразованной замкнутой орбиты, имеющей локальный бамп с точкой разрыва на участке системы инъекции. Для этого в некоторой точке на этом участке вводится бесконечно тонкий элемент с преобразованием параллельного переноса фазовых координат. Тогда для любых значений полей в ударных устройствах системы инъекции могут быть найдены такие параметры параллельного переноса, при которых преобразованная замкнутая орбита вне участка системы инъекции будет располагаться на оси вакуумной камеры (в приближении идеальной магнитной структуры ускорителя). Таким образом, для преобразованной замкнутой орбиты будет выполняться критерий локальности бампа, создаваемого ударными устройствами системы инъекции.

В случае бустера наиболее подходящей точкой разрыва является выход септума. Тогда импульсные ударные устройства системы инъекции бустера разделяются на две функциональные группы: начальная группа до септума и конечная группа после него.

Воспользуемся подходом с преобразованием замкнутой орбиты при рассмотрении схем многооборотной инъекции с двухступенчатыми импульсами. Наиболее интересными из них представляются схемы с переходом на второй уровень полей в начале последнего оборота инъекции. Суть этих схем заключается в том, что на первом этапе (при первом уровне полей в ударных устройствах) инъекция осуществляется, как при ранее рассмотренной схеме, с постоянной замкнутой орбитой. На втором этапе ударные устройства конечной группы перестраиваются таким образом, что преобразованная замкнутая орбита в точке разрыва смещается в центр масс накапливаемого пучка. Это позволяет сгруппировать инжектированные ионы ближе к оси вакуумной камеры на выходе участка системы инъекции и тем самым уменьшить горизонтальный эмиттанс накопленного пучка после филаментации.

Описанный подход к многооборотной инъекции с двухступенчатыми импульсами предполагает различные схемы для различных длительностей инъекции. Оптимальная схема двухоборотной инъекции с двухступенчатыми импульсами приведена на рис. 3. Относительные фазовые координаты инжектируемого пучка равны соответствующим координатам для схемы инъекции с постоянной замкнутой орбитой (см. формулу (7)).

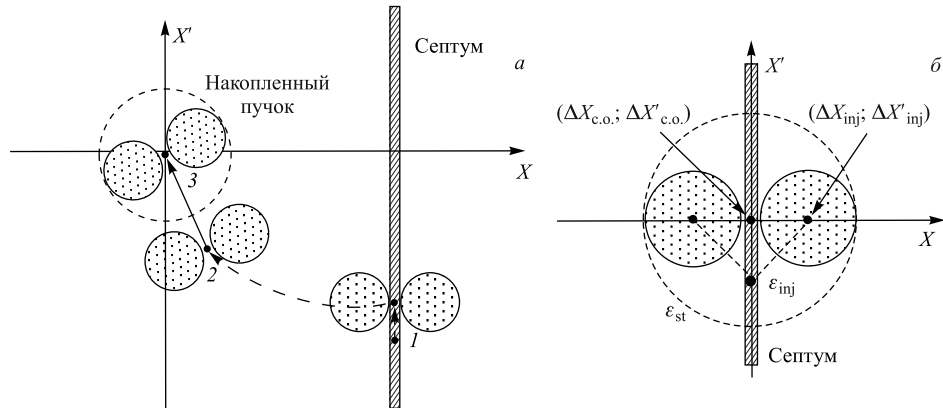


Рис. 3. Однократная двухоборотная инжекция с двухступенчатыми импульсами: *а*) фазовые портреты пучка на втором обороте инжекции; *б*) накопленный пучок в конце второго оборота инжекции и после филаментации фазового распределения ионов. Положения пучка: 1 — на выходе септума; 2 — на входе последнего ударного устройства; 3 — на выходе последнего ударного устройства

Фазовые координаты изображающей точки преобразованной замкнутой орбиты после разрыва равны следующим значениям:

$$\Delta X_{c.o.} = 0, \quad \Delta X'_{c.o.} = \frac{\Delta X_{inj}}{\operatorname{tg} \frac{\Delta \mu}{2}}. \quad (9)$$

Эта схема дает значительное уменьшение горизонтального эмиттansa накопленного пучка по сравнению со схемой с постоянной замкнутой орбитой (ср. формулы (8) и (10)):

$$\varepsilon_{st} = \left[2\sqrt{\varepsilon_{inj}} + \frac{h_{sep}}{2\sqrt{\beta}} \right]^2. \quad (10)$$

Для трехоборотной инжекции использование двухступенчатых импульсов не дает существенного выигрыша по горизонтальному эмиттансу пучка по сравнению со схемой с постоянной замкнутой орбитой, и далее данная схема инжекции не рассматривается.

6. КОНЦЕПЦИЯ МНОГОКРАТНОЙ ОДНОБОРОТНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Многokратная однооборотная инжекция является еще одним дополнительным методом инжекции пучка в бустер, который предполагается использовать в случае недостаточности тока пучка, выводимого из источника «Крион». Данный метод заключается в двух- или трехкратном повторении однооборотной инжекции пучка (каждое повторение далее будем называть стадией многократной инжекции). Проектная частота повторения стадий инжекции — 10 Гц. На каждой стадии накопленный к тому времени пучок подводится к ножу септума, и вновь инжектируемые ионы заполняют смежную с накопленным пучком область горизонтальной фазовой плоскости бустера. Первая стадия осуществляется по схеме однократной однооборотной инжекции с точной посадкой

пучка на замкнутую орбиту. На последующих стадиях перед началом ввода ионов на участке системы инъекции создается локальный бамп замкнутой орбиты, подводящий накопленный пучок к септуму. Непосредственно ввод ионов по длительности не превышает одного периода обращения пучка, после чего импульсные ударные устройства системы инъекции отключаются. Таким образом, каждая стадия инъекции имеет два этапа: этап подводки накопленного пучка (отсутствует на первой стадии) и этап собственно инъекции ионов.

Как и в случае однократной многооборотной инъекции, при описанном методе (кроме первой стадии) горизонтальная фазовая плоскость бустера заполняется кусочно. Но ввиду того, что за время между стадиями инъекции в 100 мс фазовое распределение накопленных ионов эффективно усредняется по фазам бетатронных колебаний (вследствие филаментации), по окончании каждой стадии накопленный пучок представляет собой всегда только две несвязанные друг с другом области фазовой плоскости. Фазовый портрет пучка после каждой стадии зависит от: 1) взаиморасположения замкнутой орбиты ранее накопленного и вновь инжектируемого пучков; 2) бетатронных функций инжектируемого пучка. Указанные величины могут изменяться во времени, при этом существуют два типа временных зависимостей: в течение стадии инъекции и в интервалах между стадиями (иначе — зависимость от порядкового номера стадии инъекции).

Положение замкнутой орбиты и накопленного пучка управляется импульсными ударными устройствами системы инъекции, поэтому возможно как их задание для каждой стадии инъекции в отдельности, так и их изменение в течение стадии. В качестве переменного режима работы ударных устройств будем использовать ранее рассмотренный двухступенчатый режим. Для метода многократной однооборотной инъекции применим переход полей в ударных устройствах на второй уровень (переход на вторую ступень импульсов) непосредственно перед началом ввода ионов. При этом переход осуществляется только в ударных устройствах конечной группы. В этом случае центр накопленного пучка до точки разрыва находится на преобразованной замкнутой орбите, а после разрыва он смещается относительно нее. Использование таких схем инъекции с двухступенчатыми импульсами может дать более компактное заполнение горизонтальной фазовой плоскости бустера по сравнению со схемами с постоянной замкнутой орбитой.

В свою очередь, положение и бетатронные функции инжектируемого пучка управляются септумом системы инъекции и каналом транспортировки HPLac-бустер, и, вследствие неимпульсного характера их систем электропитания, возможно только медленное изменение этих величин в промежутках между стадиями инъекции. Использование различных значений бетатронных функций и положений инжектируемого пучка на различных стадиях инъекции также приводит к более компактному фазовому портрету накопленного пучка по окончании инъекции.

На основании вышесказанного реализуется большое число различных схем многократной однооборотной инъекции пучка. Эти схемы можно классифицировать по двум критериям: 1) наличие зависимости значений бетатронных функций инжектируемого пучка от порядкового номера стадии инъекции; 2) наличие скачкообразного изменения полей в импульсных ударных устройствах системы инъекции. По первому критерию схемы инъекции разделим на схемы со статическим/динамическим режимом ввода пучка. По второму критерию — на схемы с одноступенчатым/двухступенчатым режимом работы ударных устройств системы инъекции. Наличие зависимости положения инжектируемого пучка от номера стадии инъекции считаем обязательным

условием выполнения многооборотной инжекции, так как первая и последующие стадии имеют принципиально различный подход к вводу ионов и заполнению ими фазовой плоскости.

Рассмотрим схему инжекции со статическим режимом ввода пучка и одноступенчатым режимом работы ударных устройств, представленную на рис. 4.

Горизонтальный эмиттанс пучка, накопленного с использованием данной схемы, зависит, помимо положения, эмиттанса и значений бетатронных функций инжектируемого пучка на выходе септума, от числа стадий инжекции. При этом оптимальные положения и значения бетатронных функций, позволяющие получить минимальный эмиттанс накопленного пучка, также зависят от числа стадий.

Оптимальное положение инжектируемого пучка на фазовой плоскости является величиной, зависимой от его бетатронных функций, и определяется выражениями:

$$\Delta X_{inj,i} = \sqrt{\varepsilon_{st,i}} + \sqrt{\varepsilon_{inj}} + \frac{h_{sep}}{\sqrt{\beta}}, \quad \Delta X'_{inj} = 0. \quad (11)$$

Следует отметить, что зависимость относительной координаты $\Delta X_{inj,i}$ от порядкового номера стадии инжекции i не означает изменения положения инжектируемого пучка от стадии к стадии, а говорит об изменении положения замкнутой орбиты, которая с увеличением номера стадии отодвигается от септума:

$$X_{c.o.,i} = X_{sep} - \sqrt{\varepsilon_{st,i}}, \quad X'_{c.o.} = 0. \quad (12)$$

Для определения оптимальных значений бетатронных функций инжектируемого пучка введем нормированные фазовые координаты (см. формулу (4)), в которых для нормировки используем значения структурных функций бустера на выходе септума $\beta_{sep}, \alpha_{sep}$. В этих

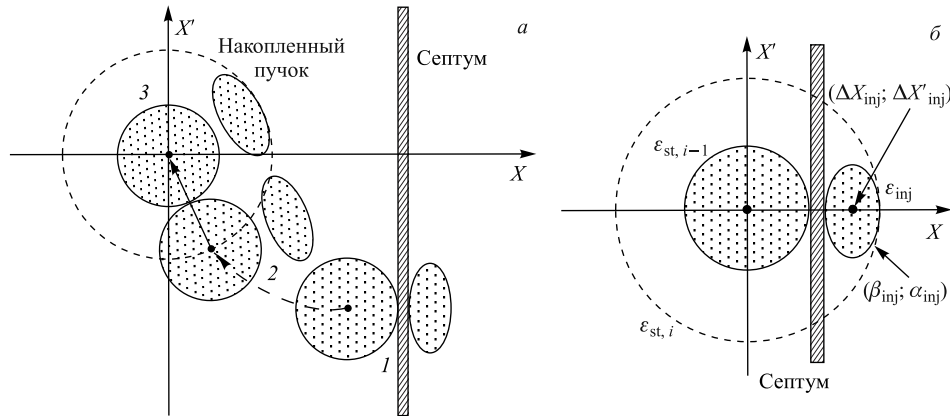


Рис. 4. Многократная однооборотная инжекция с одноступенчатым режимом работы ударных устройств: а) фазовые портреты пучка на второй (третьей) стадии инжекции; б) накопленный пучок в конце второй (третьей) стадии инжекции и после филаментации фазового распределения ионов. Положения пучка: 1 — на выходе септума; 2 — на входе последнего ударного устройства; 3 — на выходе последнего ударного устройства

координатах могут быть введены нормированные параметры Твисса $\hat{\beta}, \hat{\alpha}, \hat{\gamma} = (1 + \hat{\alpha}^2)/\hat{\beta}$, с помощью которых фазовый эллипс описывается в виде $\hat{\gamma}X^2 + 2\hat{\alpha}XX' + \hat{\beta}X'^2 = \varepsilon$. Нормированные параметры Твисса выражаются через обычные следующим образом:

$$\hat{\beta} = \frac{\beta}{\beta_{\text{sep}}}, \quad \hat{\alpha} = \alpha - \frac{\beta}{\beta_{\text{sep}}}\alpha_{\text{sep}}. \quad (13)$$

Пусть $\hat{\beta}_{\text{inj}}, \hat{\alpha}_{\text{inj}}$ — нормированные параметры инжектируемого пучка. Анализ показывает, что для оптимальной инъекции должно выполняться условие $\hat{\alpha}_{\text{inj}} = 0$. Тогда задача оптимизации сводится к нахождению значения $\hat{\beta}_{\text{inj}}$, минимизирующего эмиттанс накопленного пучка, т. е. $\hat{\beta}_{\text{inj}} = \arg \min e_n(\hat{\beta})$, где $e_n(\hat{\beta}) = \varepsilon_{\text{st},n}(\hat{\beta})/\varepsilon_{\text{inj}}$ — отношение эмиттансов накопленного и инжектируемого пучков, n — число стадий инъекции. При вычислениях толщину ножа септума положим пренебрежимо малой.

Из расчетов получаем, что для двукратной инъекции ($n = 2$) оптимальное значение $\hat{\beta}_{\text{inj}}$ будет $\cong 0,55$, для трехкратной ($n = 3$) — около 0,35. Отношения эмиттансов имеют следующие значения: $e_2(0,55) \approx 8,1$, $e_3(0,35) \approx 17,4$. Зависимости величин e_i на промежуточных стадиях инъекции также отличаются для двух схем: $e_1 \approx 1,8$ для двукратной инъекции; $e_1 \approx 2,8$, $e_2 \approx 8,7$ для трехкратной инъекции.

Рассмотрим следующую схему инъекции с динамическим режимом ввода пучка и одноступенчатым режимом работы ударных устройств. При использовании данной схемы заполнение ионами горизонтальной фазовой плоскости бустера производится аналогично предыдущей схеме инъекции (см. рис. 4). Отличие заключается в том, что в этой схеме величина $\hat{\beta}_{\text{inj}}$ и положение инжектируемого пучка относительно ножа септума являются функциями порядкового номера стадии инъекции. Из этого следует, что оптимальные параметры инжектируемого пучка не зависят от числа стадий в схеме инъекции (от кратности инъекции).

Из расчетов получаем следующие оптимальные значения $\hat{\beta}_{\text{inj}}$ в зависимости от номера стадии инъекции: $\hat{\beta}_{\text{inj},1} = 1$ (пучок согласован со структурными функциями бустера), $\hat{\beta}_{\text{inj},2} \approx 0,4$, $\hat{\beta}_{\text{inj},3} \approx 0,3$. Соответственно отношения эмиттансов накопленного и инжектируемого пучков выглядят так: $e_1 = 1$, $e_2 \approx 5,7$, $e_3 \approx 12,9$.

Теперь рассмотрим схемы с двухступенчатым режимом работы ударных устройств, показанные на рис. 5.

В данных схемах горизонтальный эмиттанс накопленного пучка дополнительно зависит от сдвига преобразованной замкнутой орбиты в точке разрыва $\Delta X_{\text{c.o.}}$ и $\Delta X'_{\text{c.o.}}$. Оптимальные параметры инъекции, минимизирующие эмиттанс, находятся аналогично тому, как это было сделано для схем с одноступенчатым режимом. Оптимальные положения инжектируемого пучка определяются по формулам (11). Оптимальный сдвиг орбиты достигается при $\Delta X'_{\text{c.o.}} = 0$. Величины $\hat{\beta}_{\text{inj}}$ и $\Delta X_{\text{c.o.}}$ находятся из решения задачи минимизации $e_n(\hat{\beta}_{\text{inj}}, \Delta X_{\text{c.o.}}) \rightarrow \min$.

Для схемы инъекции со статическим режимом ввода пучка и двухступенчатым режимом работы ударных устройств получаем следующие оптимальные параметры инжектируемого пучка: $\hat{\beta}_{\text{inj}} = 1$ для двукратной инъекции, $\hat{\beta}_{\text{inj}} \approx 0,55$ для трехкратной инъекции.

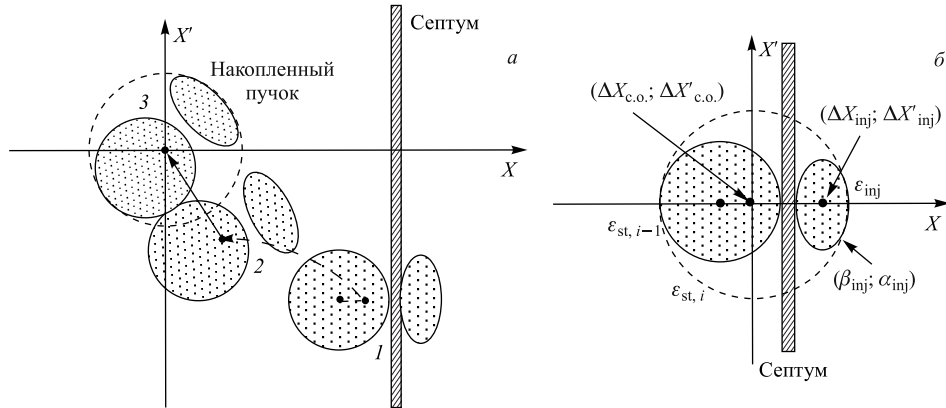


Рис. 5. Многократная однооборотная инжекция с двухступенчатым режимом работы ударных устройств: а) фазовые портреты пучка на второй (третьей) стадии инжекции; б) накопленный пучок в конце второй (третьей) стадии инжекции и после филаментации фазового распределения ионов. Положения пучка: 1 — на выходе септума; 2 — на входе последнего ударного устройства; 3 — на выходе последнего ударного устройства

Оптимальный сдвиг орбиты в точке разрыва удовлетворяет формуле

$$\Delta X_{c.o.} = \sqrt{\hat{\beta}_{inj} \varepsilon_{inj}}. \quad (14)$$

Отношения эмиттансов накопленного и инжектируемого пучков при оптимальных параметрах инжекции для данной схемы имеют значения: $e_1 = 1$, $e_2 \approx 4$ для двукратной инжекции; $e_1 \approx 1,8$, $e_2 \approx 4,4$, $e_3 \approx 8,2$ для трехкратной инжекции.

Соответственно для схемы инжекции с динамическим режимом ввода пучка и двухступенчатым режимом работы ударных устройств имеем следующие оптимальные параметры инжектируемого пучка для различных стадий: $\hat{\beta}_{inj,1} = 1$, $\hat{\beta}_{inj,2} \approx 0,5$, $\hat{\beta}_{inj,3} \approx 0,4$. Оптимальные сдвиги орбиты для второй и третьей стадий инжекции по данной схеме лишь приблизительно удовлетворяют формуле (14):

$$\Delta X_{c.o.,2} \approx \sqrt{1, 25 \hat{\beta}_{inj,2} \varepsilon_{inj}}, \quad \Delta X_{c.o.,3} \approx \sqrt{1, 1 \hat{\beta}_{inj,3} \varepsilon_{inj}}. \quad (15)$$

Отношения эмиттансов накопленного и инжектируемого пучков в зависимости от порядкового номера стадии имеют следующие значения: $e_1 = 1$, $e_2 \approx 3,2$, $e_3 \approx 6,2$.

Как видно из сравнения значений e_i , использование динамического режима ввода пучка и двухступенчатых импульсов в ударных устройствах системы инжекции дает значительное уменьшение горизонтального эмиттанса накопленного пучка.

7. СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА

На основании вышесказанного к системе инжекции пучка в бустер предъявляются следующие требования:

- 1) сохранение бетатронного акцептанса бустера;
- 2) создание локального бампа замкнутой орбиты;

- 3) наличие двухступенчатого режима работы импульсных ударных устройств;
- 4) возможность медленного изменения поля в септуме.

Также из соображений минимизации горизонтального эмиттанса накопленного пучка требуется минимальная толщина ножа септума на выходе.

Была предложена следующая система инъекции пучка, удовлетворяющая указанным требованиям и включающая электростатический септум и три пары электрических импульсных пластин.

За основу электростатического септума системы инъекции взят аналогичный электростатический септум системы медленного вывода нуклотрона [5] (рис. 6). Электростатический септум бустера состоит из нескольких секций, его полная эффективная длина равна 3 м. Каждая секция септума представляет собой пару электродов, устанавливаемую внутри криостата бустера. Анод окружает область циркуляции пучка в бустере, на выходе септума он имеет тонкую перегородку (нож) между областями циркуляции и ввода пучка. Толщина ножа септума на его выходе установлена равной 0,5 мм. Катод размещается с внешней стороны от анода. Среднее расстояние между электродами — 40 мм. Высокое напряжение подается на катод, анод заземляется. Электропитание септума циклическое, с длительностями циклов от 1 до 4 с. Максимальное напряжение между электродами — 100 кВ; создается электрическое поле величиной до 25 кВ/см с требуемой однородностью по поперечному сечению. Максимальный угол поворота пучка в септуме равняется 150 мрад.

Импульсные пластины системы инъекции пучка представляют собой три пары проводящих пластин (обозначаемые далее как ИП1–ИП3), устанавливаемых вертикально внутри вакуумных боксов, параллельно оси циркуляции пучка в бустере. Эффективные длины импульсных пластин составляют 0,55 м для ИП1, ИП3 и 0,8 м для ИП2. Импульсные пластины бустера аналогичны инфлекторным пластинам системы инъекции нуклотрона [6]. Модель узла импульсных пластин внутри криостата бустера показана на рис. 7.

Источники питания пластин импульсные [7], осуществляют независимую однополярную зарядку и разрядку пластин, составляющих пару (для удобства обозначаемых как пластина № 1 и пластина № 2), в связи с чем предусматривается пять источников питания: по одному на каждую пластину, за исключением пластины № 2 ИП1, которая

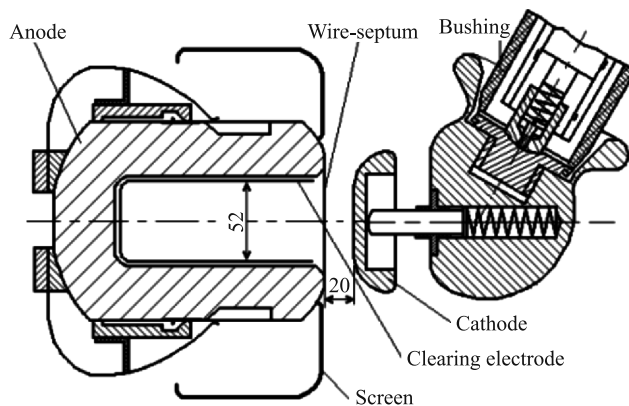


Рис. 6. Поперечное сечение электростатического септума нуклотрона [5]

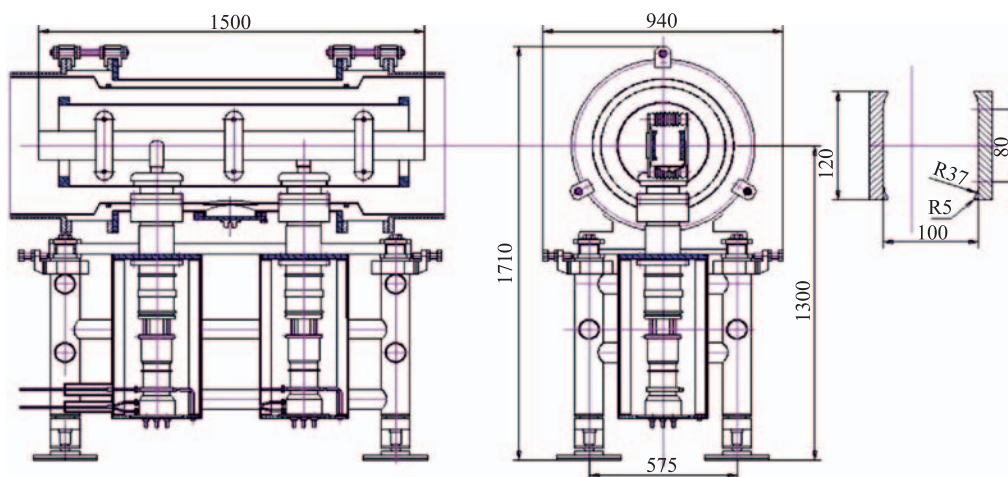


Рис. 7. Конструкция криогенного варианта узла импульсных пластин

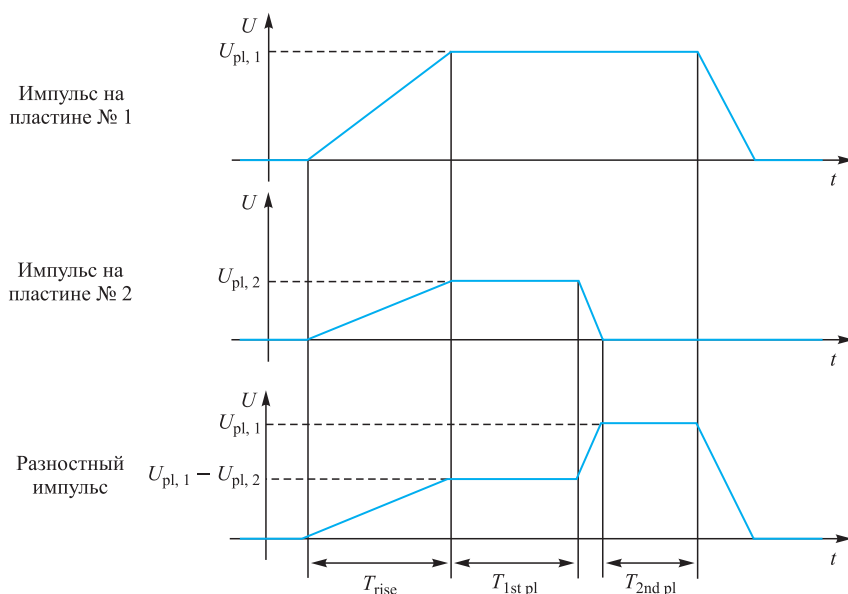


Рис. 8. Двухступенчатый режим работы импульсных пластин

заземляется. Между пластинами создается электрическое поле величиной до 5 кВ/см с требуемой однородностью по поперечному сечению. Независимость питания пластин обеспечивает двухступенчатый режим работы, как это показано на рис. 8. Более подробная информация о параметрах системы электропитания пластин бустера может быть найдена в работе [7].

Система инжекции размещается в окрестности первого прямолинейного промежутка бустера. Схема расположения устройств системы приведена на рис. 9.

Для сохранения бетатронного акцептанса бустера устройства системы инжекции устанавливаются так, что их конструктивные элементы располагаются за максимальной оги-

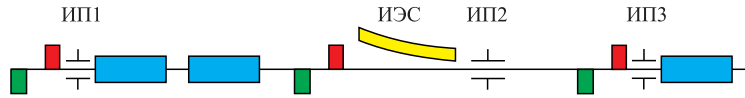


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Размещение элементов системы инъекции пучка в бустере. Синим цветом обозначены структурные дипольные магниты, красным — фокусирующие квадрупольные линзы, зеленым — дефокусирующие квадрупольные линзы, желтым — инжекционный электростатический септум (ИЭС)

бающей пучка (огibaющей пучка с эмиттансом, равным аксептансу бустера). В целях минимизации электрических напряжений на импульсных пластинах предполагается, что максимальная огibaющая касается поверхности устройств системы инъекции.

Максимальная огibaющая пучка находится по формуле, аналогичной (1):

$$a_{x,\max}(s) = \sqrt{\beta_x(s) A_x} + D_x(s) \frac{\Delta p}{p_{\max}} + \Delta x_{c.o.}(s). \quad (16)$$

Отсюда определяются координаты различных элементов устройств системы инъекции, указанные в табл. 1. Отметим, что положительное направление в табл. 1 означает направление от геометрического центра бустера.

Таблица 1. Координаты конструктивных элементов устройств системы инъекции относительно оси вакуумной камеры бустера (в мм)

Нож электростатического септума на выходе	+37
Ближняя к циркулирующему пучку поверхность импульсных пластин:	
пластина № 1 ИП1	-51
пластина № 2 ИП1	+51
пластина № 1 ИП2	-36
пластина № 2 ИП2	+57
пластина № 1 ИП3	-51
пластина № 2 ИП3	+51

Представленная система инъекции пучка в бустер в полной мере соответствует всем предъявленным к ней требованиям и позволяет реализовать все вышеописанные схемы инъекции. Дополнительные требования к каналу транспортировки НЛас–бустер также удовлетворяются. Для всех рассматриваемых в настоящее время вариантов канала возможна перестройка оптической системы в интервалах между стадиями многократной инъекции и установка специального дипольного магнита в конце канала для регулировки (совместно с электростатическим септумом) фазовых координат инжектируемого пучка на выходе септума.

8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА

Был проведен ряд расчетов по динамике пучка при его инъекции в бустер с помощью различных схем. Для моделирования использовалась программа MAD [8]. Расчеты про-

водились в приближении идеальной магнитной структуры бустера. В качестве начальной точки был выбран выход из электростатического септума системы инжекции.

Значения основных параметров инжектируемого пучка, применявшиеся при моделировании, представлены в табл. 2. Стоит отметить, что значения поперечных эмиттансов соответствуют акцептансу ускорителя НЛас $10 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, взятому с 50 %-ным запасом с учетом ошибок перевода пучка из НЛас в бустер.

Из рассмотренного множества схем инжекции пучка было отобрано 11 схем, при использовании которых горизонтальный эмиттанс накопленного пучка после филамента-

Таблица 2. Основные параметры пучка, инжектируемого в бустер

Тип ионов	Au^{31+}
Энергия ионов, МэВ/нуклон	3,2
Магнитная жесткость ионов, Тл · м	1,64
Электрическая жесткость ионов, МВ	40,6
Полный горизонтальный/вертикальный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$	15/15
Длительность импульса инжекции, мкс	8,5–25,5

Таблица 3. Горизонтальные эмиттансы накопленного пучка

Схема инжекции пучка	Горизонтальный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$
а) Однократная однооборотная инжекция согласованного пучка с точной посадкой на замкнутую орбиту	15
б) Однократная однооборотная инжекция со смещением пучка	15–150
в) Однократная однооборотная инжекция несогласованного пучка	15–150
г) Однократная многооборотная инжекция с одноступенчатым режимом	115
д) Однократная двухоборотная инжекция с двухступенчатым режимом	65
е) Двукратная однооборотная инжекция с одноступенчатым режимом и статическим вводом ионов	130
ж) Двукратная однооборотная инжекция с одноступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	90
з) Двукратная однооборотная инжекция с двухступенчатым режимом и статическим вводом ионов	65
и) Двукратная однооборотная инжекция с двухступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	50
к) Трехкратная однооборотная инжекция с двухступенчатым режимом и статическим вводом ионов	130
л) Трехкратная однооборотная инжекция с двухступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	95

ции фазового распределения ионов не превышает горизонтального акцептанса бустера. В табл. 3 даны значения горизонтальных эммиттансов пучка для отобранных схем инъекции. Соответствующие фазовые портреты пучка показаны на рис. 10.

Результаты моделирования динамики ионов при инъекции представлены на рис. 11–16. На них для некоторых схем инъекции даны огибающие инжектируемого и накопленного пучков в окрестности первого прямолинейного промежутка бустера. Параметры инжектируемого пучка на выходе электростатического септума, использованные при моделировании, приведены в табл. 4.

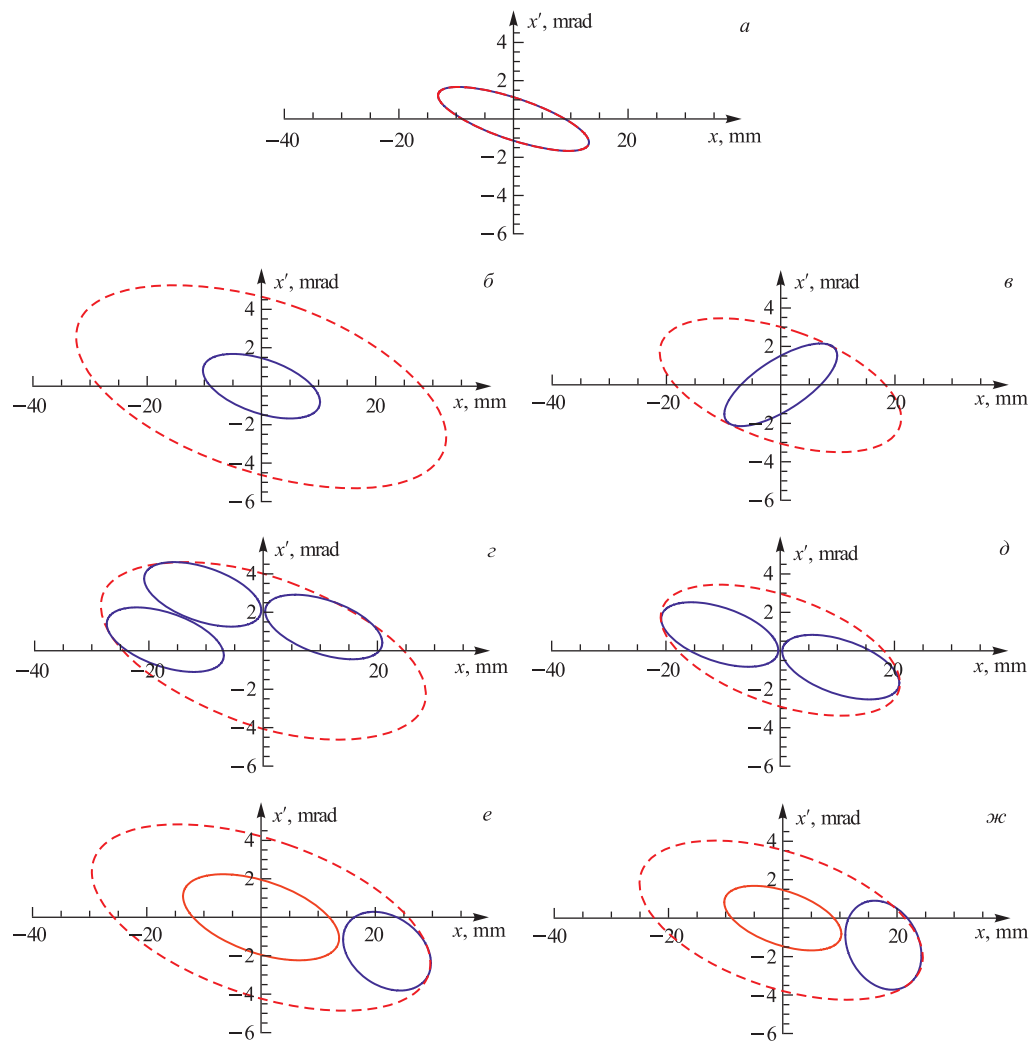


Рис. 10. Фазовые портреты накопленного пучка в точке выхода септума по окончании инъекции и после филаментации фазового распределения ионов. Буквенные обозначения рисунков соответствуют обозначениям схем инъекции в табл. 3

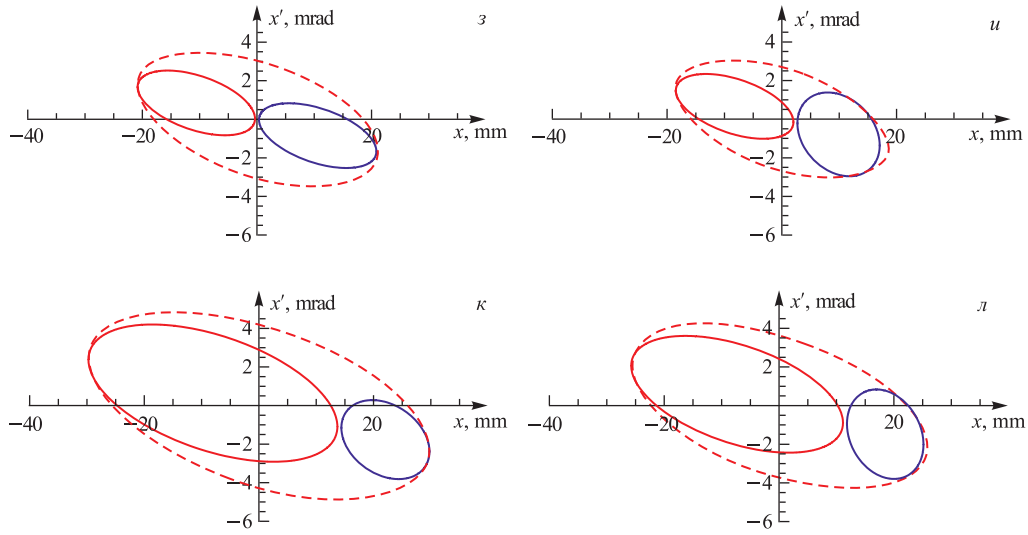


Рис. 10. Окончание

Таблица 4. Параметры инжектируемого пучка на выходе септума

Схема инжекции	X_{inj} , мм	X'_{inj} , мрад	β_{inj} , м	α_{inj}
а, б	47,2	-9,62	7	0,56
в	47,2	-9,62	См. рис. 17	
г, д	47,2	-1,56	7	0,56
е:				
1-я стадия	44,7	-9,1	3,9	0,32
2-я стадия	44,7	-3,5	3,9	0,32
ж:				
1-я стадия	47,2	-9,62	7	0,56
2-я стадия	43,7	-3,4	3	0,24
з:				
1-я стадия	47,2	-9,62	7	0,56
2-я стадия	47,2	-3,69	7	0,56
и, л:				
1-я стадия	47,2	-9,62	7	0,56
2-я стадия	44,2	-3,44	3,4	0,27
3-я стадия	43,7	-3,43	3	0,24
к:				
1-я стадия	44,7	-9,1	3,9	0,32
2-я стадия	44,7	-3,5	3,9	0,32
3-я стадия	44,7	-3,52	3,9	0,32

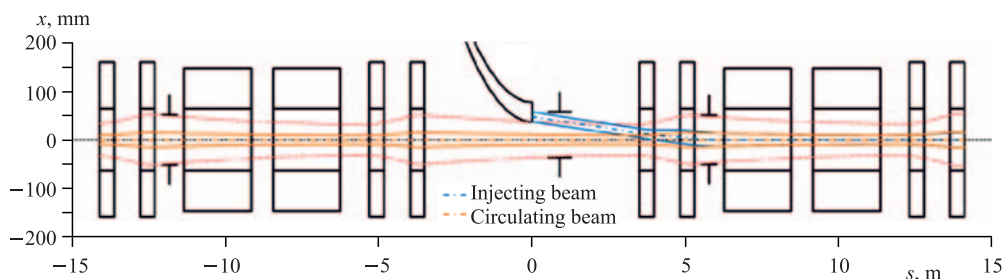


Рис. 11. Огибающие накапливаемого и накопленного пучков для основной схемы однократной однооборотной инъекции

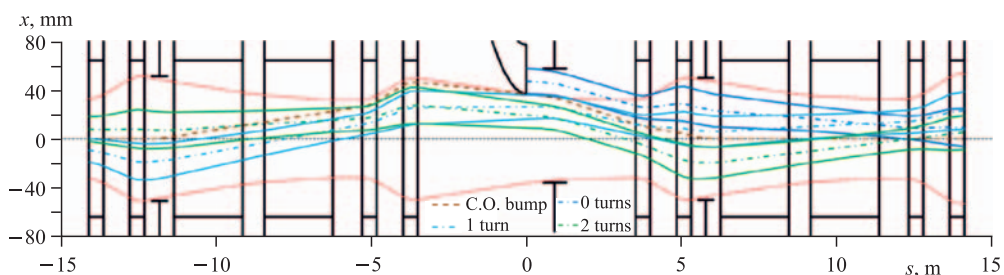


Рис. 12. Огибающие накапливаемого пучка на третьем обороте инъекции по схеме однократной многооборотной инъекции с одноступенчатым режимом работы импульсных пластин

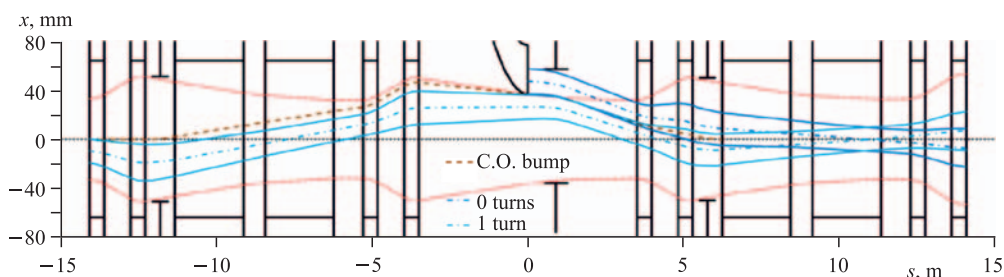


Рис. 13. Огибающие накапливаемого пучка на втором обороте инъекции по схеме однократной двухоборотной инъекции с двухступенчатым режимом работы импульсных пластин

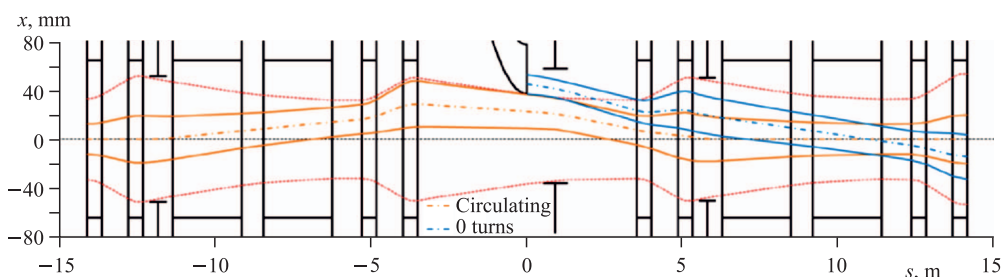


Рис. 14. Огибающие инжектируемого и накопленного пучков на второй стадии инъекции по схеме двукратной однооборотной инъекции с одноступенчатым режимом работы импульсных пластин и статическим режимом ввода ионов

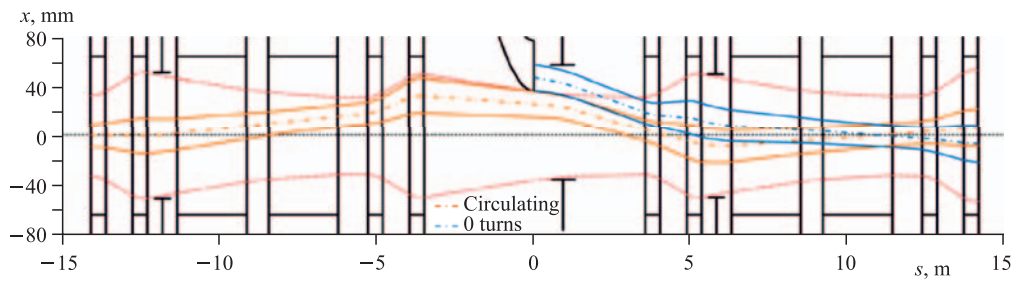


Рис. 15. Огибающие инжектируемого и накопленного пучков на второй стадии инъекции по схеме двукратной однооборотной инъекции с двухступенчатым режимом работы импульсных пластин и статическим режимом ввода ионов

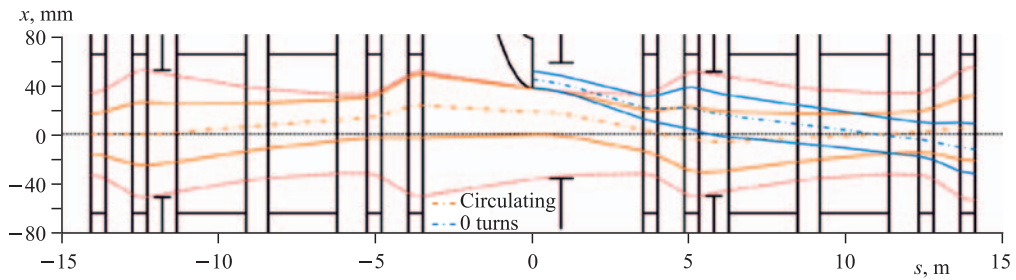


Рис. 16. Огибающие инжектируемого и накопленного пучков на третьей стадии инъекции по схеме трехкратной однооборотной инъекции с двухступенчатым режимом работы импульсных пластин и динамическим режимом ввода ионов

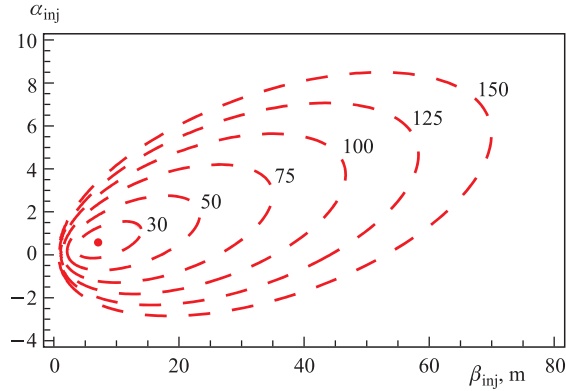


Рис. 17. Контуры равных значений горизонтального эмиттанса накопленного пучка в зависимости от значений бетатронных функций инжектируемого пучка на выходе электростатического септума бустера

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для бустера ускорительного комплекса NICA была выбрана концепция многовариантной инъекции пучка тяжелых ионов, включающая методы однооборотной, многооборотной и многократной инъекции. Эта концепция позволит в будущем решать задачи

накопления пучков требуемой интенсивности при наличии различных факторов, приводящих к потерям ионов.

Представленный в работе концептуальный проект системы инъекции в полной мере реализует все предусмотренные методы инъекции. Система является достаточно гибкой в плане заполнения ионами фазового пространства. Наличие таких дополнительных возможностей, как независимое питание импульсных пластин и быстрая перестройка магнитной системы канала транспортировки пучка НЛас–бустер, позволяет осуществить большое количество различных схем инъекции ионов.

В данной работе было рассмотрено 11 схем инъекции, не приводящих к систематическим потерям ионов пучка. Проведенные расчеты показали, что при многооборотной и многократной инъекции горизонтальный эмиттанс накопленного пучка превышает $50 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ (при эмиттансе инжектируемого пучка в $15 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$). При этом именно использование независимого питания пластин и перестройки канала НЛас–бустер приводит к более компактному заполнению ионами фазового пространства и, следовательно, к наименьшим значениям эмиттанса накопленного пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agarov N. et al.* Present Status of NICA Project // Proc. of COOL2013, Murren, Switzerland, 2013. P. 197–201.
2. *Костромин С. А. и др.* Применение методов охлаждения пучков в проекте NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5(174–175). С. 537–562.
3. *Butenko A. et al.* Design of the Nuclotron Booster in the NICA Project // Proc. of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010. P. 681–683.
4. *Eliseev A. V. et al.* RF Systems and Bunch Formation at NICA // Proc. of IPAC2011, San Sebastian, Spain, 2011. P. 2511–2513.
5. *Agarov N. et al.* Slow Beam Extraction from the Nuclotron // Proc. of the 2001 Part. Accel. Conf., Chicago, USA, 2001. P. 1646–1648.
6. *Buldakovsky V. N. et al.* Beam Injection into the Nuclotron // Proc. of PAC'97, Vancouver, Canada, 1998. P. 184–186.
7. *Буланов В. А. и др.* Концептуальный проект системы питания отклоняющих пластин многовариантной инъекции в бустер ускорительного комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 5(189). С. 1074.
8. <http://mad.web.cern.ch>