

Научная статья

УДК 621.384.6

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-5-16

Динамика частиц в инжекторе тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ)*

Геннадий Николаевич Кропачев^{1,2}, Тимур Вячеславович Кулевой^{1,3}
Алексей Леонидович Ситников¹, Владимир Сергеевич Скачков¹
Екатерина Рамисовна Хабибуллина^{1,3}, Максим Львович Сметанин⁴
Александр Валентинович Тельнов⁴, Николай Валентинович Завьялов⁴

¹НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Московская область, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

⁴Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ)
Саров, Россия

^{1,2}kropachev@itep.ru

^{1,3}kulevoy@itep.ru

¹aleksey.sitnikov@itep.ru

¹skachkov@itep.ru

^{1,3}ekaterina.khabibullina@itep.ru

⁴mlsmetanin@vniief.ru

⁴avtelnov@vniief.ru

⁴nvzavyalov@vniief.ru

Аннотация

В настоящее время на базе Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) разрабатывается проект комплекса для исследования воздействия ионизирующих излучений космического пространства, основой которого является синхротронный ускоритель, обеспечивающий ускорение протонов и различных типов ионов вплоть до 209Bi. Ускоритель включает два инжекторных комплекса (один из которых является источником протонов и легких ионов, второй – тяжелых ионов), бустерный ускоритель и основной синхротрон. В НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ разрабатывается ускоритель тяжелых ионов импульсного типа ЛУ2 на энергию до 4 МэВ на нуклон с током 10 мА. При этом должны ускоряться ионы, для которых отношение массы к заряду находится в пределах $4 \div 8$. Предлагается линейный ускоритель, включающий в себя секцию RFQ и две секции DTL, работающие на кратных частотах. Каждая секция DTL имеет модульную структуру и состоит из отдельных индивидуально фазированных резонаторов H-типа (IH-DTL) и квадрупольных линз, расположенных между резонаторами для фокусировки пучка. Такая структура DTL обеспечивает компактность линейного ускорителя, допускает по-секционную настройку и последовательный ввод в эксплуатацию. Между всеми секциями ускорителя осуществляется 6D-согласование пучков. Представлены результаты численного моделирования динамики частиц в ЛУ2.

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Ключевые слова

RFQ, DTL, моделирование динамики пучка, тяжелые ионы

Для цитирования

Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Скачков В. С., Хабибуллина Е. Р., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Завьялов Н. В. Динамика частиц в инжекторе тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ) // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 5–16. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-5-16

Beam Dynamics in the Heavy Ion Injector LU2 for the Synchrotron Research Complex (SRC)

Gennady N. Kropachev^{1,2}, Timur V. Kulevoy^{1,3}, Alexey L. Sitnikov¹
Vladimir S. Skachkov¹, Ekaterina R. Khabibullina^{1,3}, Maxim L. Smetanin⁴
Alexander V. Telnov⁴, Nikolay V. Zavyalov⁴

¹NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia

³National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

⁴FSUE RFNC – VNIIEF, Sarov, Russia

^{1,2}kropachev@itep.ru

^{1,3}kulevoy@itep.ru

¹aleksey.sitnikov@itep.ru

¹skachkov@itep.ru

^{1,3}ekaterina.khabibullina@itep.ru

⁴mlsmetanin@vniief.ru

⁴avtelnov@vniief.ru

⁴nvzavyalov@vniief.ru

Abstract

The project of the complex for studying ionizing radiation exposure from outer space based on the synchrotron accelerator of protons and various types of ions up to 209Bi is being developed at the Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (FSUE RFNC – VNIIEF). The accelerator includes two injection complexes (one of which is the source of protons and light ions, the second - heavy ions), the booster accelerator and the main synchrotron. The pulsed type heavy ions linac is being developed at the NRC “Kurchatov Institute” – KCTEF (Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics). The ions with mass-to-charge ratio $4 \div 8$ with current of 10 mA will be accelerated up to 4 MeV/u. The linac is proposed, including the RFQ and two DTL sections operating at multiple frequencies. Each DTL section is modular and consists of individually phased H-type resonators (IH-DTLs). Quadrupole lenses located between the resonators for the beam focusing. This DTL structure ensures the accelerator compactness and allows section-by-section configuration and sequential commissioning. 6D beam matching between all sections of the linac is carried out. The results of beam dynamics simulation in linear accelerator are presented.

Keywords

RFQ, DTL, beam dynamics simulation, heavy ions

For citation

Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Sitnikov A. L., Skachkov V. S., Khabibullina E. R., Smetanin M. L., Telnov A. V., Zavyalov N. V. Beam dynamics in the heavy ion injector LU2 for the Synchrotron Research Complex (SRC). *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 5–16 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-5-16

Схема ускорителя ЛУ2

Предполагается, что ускоритель ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса [1] будет иметь секцию RFQ [2] и две секции с трубками дрейфа DTL1 [3] и DTL2 [4], работающих на кратных частотах (рис. 1). Ускорители RFQ обладают рядом неоспоримых преимуществ: низкая энергия инжекции, большой коэффициент захвата в режим ускорения без увеличения фазовой плотности в поперечном пространстве, отсутствие требования предварительной группировки пучка и др. Однако секция с RFQ удобна только как начальная часть

линейного ускорителя на высокие энергии и большую интенсивность, поскольку при больших скоростях не удастся обеспечить высокого темпа ускорения. Секции с DTL1 и DTL2 позволяют ускорять ионы на требуемую энергию без потерь частиц. Секции с DTL1 и DTL2 построены по модульному принципу и состоят из цепочки отдельных, индивидуально фазированных резонаторов с фокусировкой магнитными квадрупольями, размещаемыми между ними. Между RFQ и DTL1 располагается канал транспортировки МEBT1, который осуществляет 6-мерное согласование RFQ и DTL1. Канал транспортировки МEBT2 осуществляет 6-мерное согласование между DTL1 и DTL2.

Основные требования к разрабатываемому ускорителю

Определим базовые характеристики ускорителя. Транспорт ускорителя – это отношение числа частиц на выходе ускорителя к числу инжектируемых частиц. Трансмиссия ускорителя – это отношение числа ускоренных частиц на выходе ускорителя к числу инжектируемых частиц.

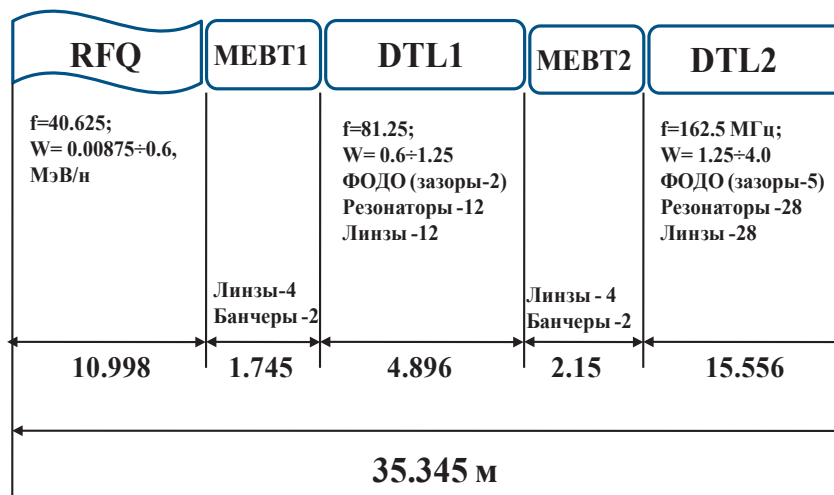


Рис. 1. Схема ускорителя ЛУ2

Fig. 1. LU2 scheme

Сформулируем основные требования к разрабатываемому ускорителю:

- ионы с отношением массы к заряду: $4 \leq A/Z \leq 8$;
- ток ускоренных частиц: ≥ 10 мА;
- транспорт: ~ 100 %;
- трансмиссия: ≥ 95 %;
- режим работы: импульсный;
- максимальная напряженность на поверхности электродов (в единицах Килпатрика):

$K_p = 1,8$;

- отношение акцептанса канала к эмиттансу пучка ≥ 3 .

Основные параметры RFQ и ИH-DTL представлены в таблице.

Разрабатываемый ускоритель является импульсной машиной, но должен работать в режиме длительного временного промежутка, тем самым обладать высокой надежностью, что накладывает на ускоряющие структуры дополнительные требования. Особенностью ускорителей с таким режимом работы является требование практического отсутствия потерь в ускоряющих структурах. Поэтому в канале с RFQ необходимо обеспечить прохождение пучка, близкое к 100 %.

При создании ускорителя особую роль играет выбор напряженности электрического поля. Высокое значение напряженности приводит к увеличению числа электрических пробоев, низкое – к уменьшению аксептанса канала. Напряженность электрического поля на поверхности электродов обычно выбирают, ориентируясь на критерий Килпатрика. Принимая во внимание литературные данные по рекомендуемой напряженности поля на поверхности электродов [5], выберем величину $K_p = 1,8$, где K_p – единицы Килпатрика.

Основные расчетные параметры RFQ & DTL1 & DTL2 для ускорителя ЛУ2

The main parameters of the RFQ & DTL1 & DTL2 for LU2

Параметр	Значение		
Отношение массы к заряду	≤ 8		
Нормализованный эмиттанс пучка, [п мм·мрад]	2		
Ток инжекции, [мА]	10		
Напряжение инжекции, [кВ]	70		
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов, [Кр]	1,8		
Ускоряющая структура	RFQ	DTL1	DTL2
Рабочая частота, [МГц]	40,625	81,25	162,5
Энергия пучка, [МэВ/нуклон]	$0,00875 \div 0,6$	$0,6 \div 1,25$	$1,25 \div 4$
Нормализованный аксептанс канала, [п мм·мрад]	6	7,5	8,1
Отношение аксептанса к эмиттансу	3		
Синхронная фаза, [град]	$-90 \div -35$	$-50 \div -40$	$-50 \div -40$
Радиус апертуры, [мм]	$32,6 \div 8,9$	21	25
Напряжение между электродами, [кВ]	170	–	
Максимальное поле в зазоре, [кВ/см]	–	80	$77 \div 107$
Средний радиус, [мм]	12,5	–	
Радиус электрода, [мм]	10	–	
Максимальная модуляция	1,809	–	
Число магнитных линз	–	12	28
Длина линзы, [мм]	–	130	130
Радиус апертуры линзы, [мм]	–	22,5	22,5
Максимальный градиент, [Тл/м]	–	41	34
Число резонаторов	–	12	28
Длина резонатора, [мм]	–	208	$280 \div 442$
Длина структуры, [м]	11,0	4,9	15,6

Динамика пучка ионов в секции с RFQ

С использованием базовых параметров канала RFQ, представленных в таблице, проведено моделирование динамики пучка в секции RFQ. Вычисления проводились методом крупных частиц [6] с помощью программ TraceWin [7].

При выборе параметров ускоряюще-фокусирующего канала ускорителя использована методика, основанная на законах подобия в RFQ и описанная в работе [8] и примененная в [9; 10]. Параметры RFQ выбраны исходя из условия приблизительного равенства набегов фаз продольных и поперечных колебаний ионов на периоде фокусировки. Рабочая точка располагается вне полос параметрического резонанса между фазовыми и радиальными колебаниями частиц. При таком выборе параметров RFQ, с одной стороны, достигается достаточно низкая связь между степенями свободы, а с другой стороны, обеспечивается максимальный темп ускорения и высокий продольный захват.

Одна из основных характеристик ускорителя – акцептанс. Как известно из [2], акцептансом канала называют максимально возможный эмиттанс согласованного пучка, еще пропускаемого каналом. На вход RFQ поступает пучок с эмиттансом 2π мм мрад. Тогда, следуя книге И. М. Капчинского [2], в качестве акцептанса примем величину 6π мм мрад, т. е. в 3 раза большую.

При 4-мерном согласовании пучка (стандартном согласовании) начальные условия на входе RFQ имеют следующий вид. Частицы на продольной фазовой плоскости распределяются равномерно на отрезке с фазовой протяженностью 360° с разбросом по энергиям $\pm 1\%$, что является характерным значением для большинства источников ионов. В поперечном направлении на вход подается практически аксиально-симметричный сходящийся пучок.

На рис. 2 приведены огибающие пучка в RFQ. Из данного рисунка видно, что максимумы огибающих пучка практически не возрастают, т. е. пучок хорошо согласован с ускорителем. Из 100 000 инжектируемых макрочастиц 99 986 дошли до выхода ускорителя, т. е. величина транспорта составляет 99,99 % ($\sim 100\%$), трансмиссия ускорителя составляет 99,4 %. Кроме того, можно отметить, что наиболее плотная часть пучка (его ядро) занимает примерно 0,75 от апертурной области канала, где действие сил электрического поля, как правило, линейно, что дает минимальный вклад в рост фазового объема. На данном рисунке также можно заметить хорошее согласование пучка с ускорителем.

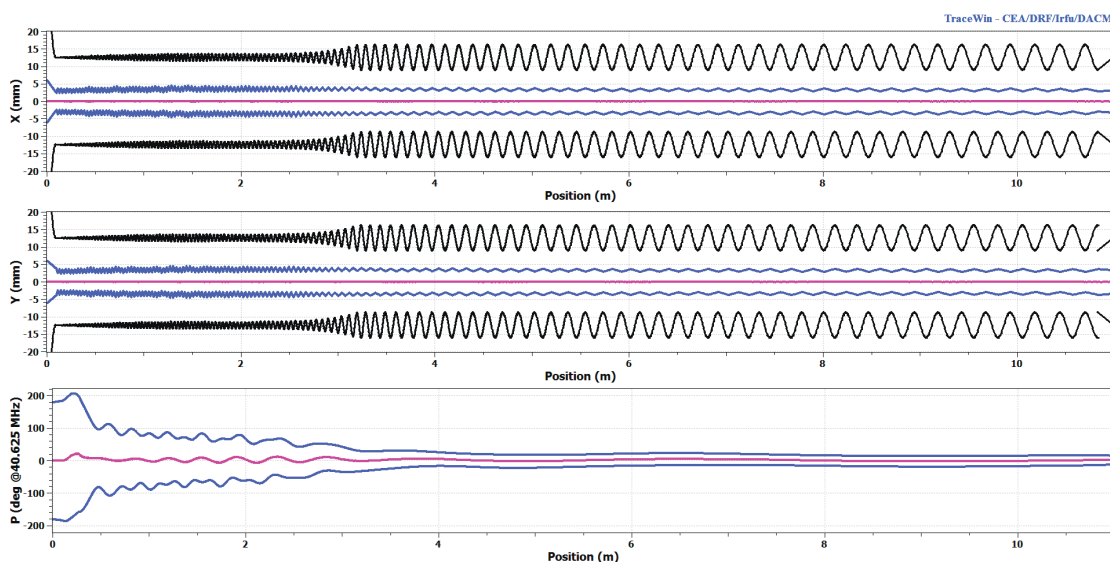


Рис. 2. Огибающие пучка в RFQ

Fig. 2. Beam envelopes in RFQ

Незначительная часть ионов (меньше 0,5 %) не набрала энергии синхронной частицы и в дальнейшем будет потеряна в магнитных линзах канала согласования. Разработанный ка-

нал RFQ с нормализованным аксептансом $6 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ устойчив к величине входного эмиттанта в широком диапазоне его изменения.

Динамика пучка ионов в ускоряющей секции DTL1

Как уже отмечалось выше, секция DTL1 будет состоять из цепочки отдельных, индивидуально фазированных ускоряющих резонаторов с фокусировкой магнитными квадрупольными, размещаемыми между этими резонаторами. Переход в секции DTL1 к частоте возбуждения, вдвое большей, чем частота в RFQ (40.625 МГц), позволяет уменьшить габариты резонатора с трубками дрейфа и увеличить допустимую длину периода фокусировки. Нормализованный аксептанс канала A_n связан с частотой ускоряющего поля f , радиусом апертуры канала R_a , минимальным значением частоты поперечных колебаний ν_F и кратностью периода фокусировки K_F , соотношением [2]:

$$A_n = \nu_F \frac{f \cdot R_a^2}{K_F}, \quad (1)$$

где $K_F = S_F/(\beta\lambda)$, S_F – длина периода фокусировки.

Таким образом, при переходе на частоту вдвое большую можно увеличить вдвое кратность периода фокусировки, не изменяя радиус апертуры канала и получить такую же величину аксептанса.

Для минимизации длины в качестве ускоряющих элементов выбран 2-зоровый четвертьволновый резонатор [3]. В качестве базовой магнитной линзы используется квадрупольная линза длиной 130 мм, радиусом апертуры 22,5 мм и максимальным градиентом $G_{\max} = 48 \text{ Тл/м}$. Данная линза оптимальна по соотношению достижимых градиентов, продольного размера и линейности поля.

При разработке ускоряющей секции DTL1 были рассмотрены различные структуры периодов фокусировки [11] с использованием двухзорового резонатора (дуплеты, триплеты и др.). Показано, что период фокусировки типа ФОДО наиболее полно удовлетворяет требованиям к DTL1. Когда после магнитной линзы следует ускоряющий промежуток, действие магнитной линзы эффективнее, чем в дуплетах и триплетах. Это позволяет существенно снизить градиенты G в магнитной линзе и обеспечить в них $G \leq G_{\max}$. Таким образом, период типа ФОДО позволяет обеспечить требуемое значение аксептанса канала при достижимых градиентах в базовой квадрупольной линзе.

В таблице приведены основные параметры DTL1 секции на основе структуры периода фокусировки ФОДО. Как и для RFQ, параметры DTL1 выбраны исходя из условия приближительного равенства набегов фаз продольных и поперечных колебаний ионов на периоде фокусировки. Рабочая точка располагается вне полос параметрического резонанса между фазовыми и радиальными колебаниями частиц. При таком выборе параметров DTL1, с одной стороны, достигается достаточно низкая связь между степенями свободы, а с другой стороны, обеспечивается максимальный темп ускорения и высокий продольный захват. Заметим, что равновесная фаза изменяется в пределах $-50^\circ \div -40^\circ$. С одной стороны, это обеспечивает значительную фазовую протяженность продольного аксептанса, что необходимо для надежного перезахвата эффективного эмиттанта RFQ, с другой стороны, такое изменение синхронной фазы позволяет уменьшить фактор дефокусировки (снижаются градиенты в магнитных линзах) и увеличить темп ускорения (сокращается длина ускорителя). Отличительной особенностью данной ускоряющей секции DTL1 является использование резонаторов одной длины 208 мм, что позволит значительно упростить изготовление и настройку ускоряющей секции, а также снизить стоимость изготовления.

На входе в канал DTL1, по аналогии с RFQ, определяются согласованные начальные условия (согласованный эмиттанс). С учетом найденных начальных согласованных условий определены огибающие пучка и его профиль. На рис. 3 представлены огибающие пучка в DTL1 для периода фокусировки ФОДО. Из данного рисунка видно, что максимумы огибающих пучка практически не возрастают, т. е. пучок хорошо согласован с ускорителем. Из 99400 инжектируемых макрочастиц все дошли до выхода ускорителя, т. е. в канале нет потерянных частиц и величина транспорта = 100 %, трансмиссии = 100 %.

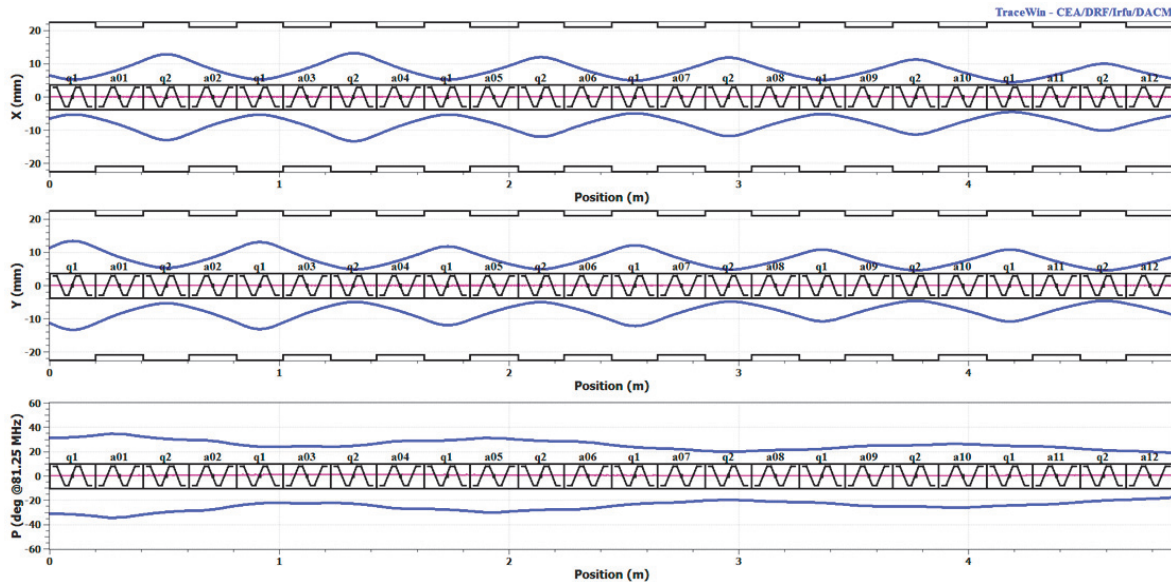


Рис. 3. Огибающие пучка в DTL1 для периода фокусировки ФОДО

Fig. 3. Beam envelopes in DTL1 for the FODO focusing period

Динамика пучка ионов в ускоряющей секции DTL2

Согласно соотношению 1, при переходе на частоту вдвое большую можно увеличить вдвое кратность периода фокусировки, не изменяя радиус апертуры канала и получить такую же величину акцептанса. Переход в секции DTL2 к частоте возбуждения 162,5 МГц, вдвое большей, чем частота в DTL1 (81,25 МГц), позволяет уменьшить габариты резонатора с трубками дрейфа и увеличить допустимую длину периода фокусировки и существенно сократить число резонаторов в ускорителе.

Как показано выше (формула 1), акцептанс канала обратно пропорционален длине периода фокусировки, поэтому для минимизации длины в качестве ускоряющих элементов выбран 5-ззорный четвертьволновый резонатор [4]. Особенность данного резонатора – при всех одинаковых длинах зазоров максимальное продольное электрическое поле на оси для крайних зазоров вдвое меньше поля в остальных зазорах, т. е. выполняется следующее условие: длина зазора $g = \text{const}$; $E_{g1} = E_{g5} = E_{g\text{max}}/2$; $E_{g2} = E_{g3} = E_{g4} = E_{g\text{max}}$. Такое распределение поля облегчает настройку резонаторов, а также минимизирует максимальную напряженность электрического поля на поверхности трубок дрейфа.

Период фокусировки типа ФОДО в секции DTL2 позволяет обеспечить требуемое значение акцептанса канала при достижимых градиентах в базовой квадрупольной линзе и приемлемых значениях апертуры трубок дрейфа. В таблице приведены основные параметры DTL2 секции на основе структуры периода фокусировки ФОДО.

На входе в канал DTL2, по аналогии с DTL1, определяются согласованные начальные условия (согласованный эмиттанс). С учетом найденных начальных согласованных условий определены огибающие пучка и его профиль. На рис. 4 представлены огибающие пучка в DTL2 для периода фокусировки ФОДО.

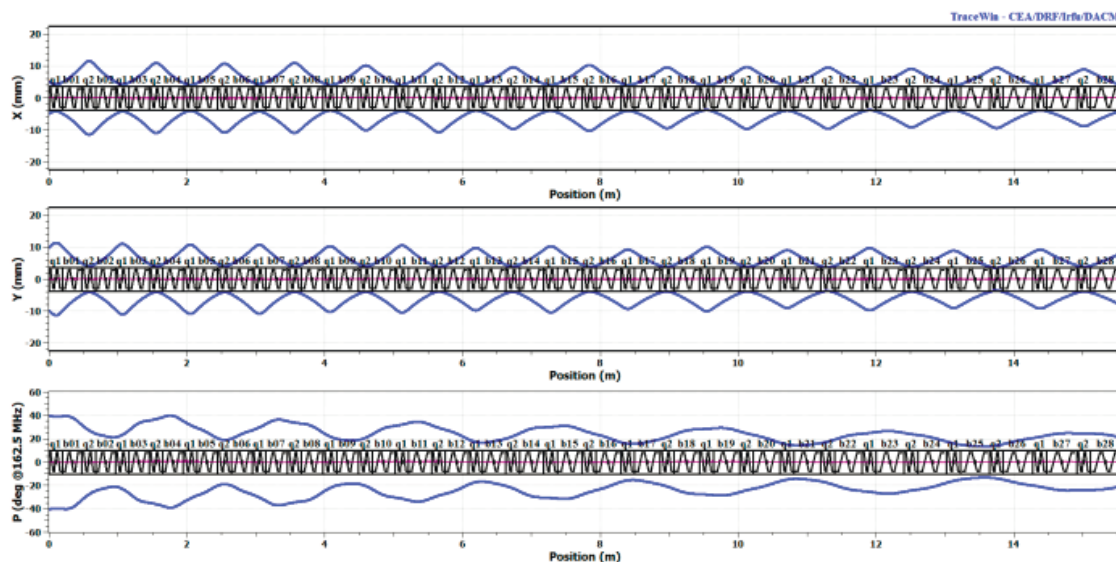


Рис. 4. Огибающие пучка в DTL2 для периода фокусировки ФОДО

Fig. 4. Beam envelopes in DTL2 for the FODO focusing period

Величина транспорта и трансмиссии в секции DTL2 составляет 100 %. Наиболее плотная часть пучка (его ядро) не превышает 0,75 от апертурной области канала, где, как правило, действие сил электрического поля линейно, что дает минимальный вклад в рост фазового объема.

Динамика пучка ионов в каналах МЕВТ1 и МЕВТ2

Между RFQ и DTL1 располагается канал транспортировки МЕВТ1, который обеспечивает 6-мерное согласование RFQ и DTL1. Канал транспортировки МЕВТ2 осуществляет 6-мерное согласование между DTL1 и DTL2.

МЕВТ1 состоит из четырех квадрупольных магнитных линз, обеспечивающих четырехмерное поперечное согласование, а также двух двухзоровых банчеров для продольного согласования. Необходимым условием эффективной работы канала МЕВТ1 является обеспечение требуемой величины аксептанса, которая не должна быть меньше величины аксептанса последующей секции DTL1, т. е. не меньше $7,5 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Общая длина канала МЕВТ1 составляет 1745 мм. Предполагаемая для использования магнитная квадрупольная линза [12] имеет следующие параметры: длина линзы в пространстве – 170 мм (имеются шиммы), радиус апертуры по пучку – 30 мм, максимальный градиент 32 Тл/м, область, занимаемая магнитным полем линзы, составляет практически 240 мм. Каждый банчер имеет длину 170 мм и радиус апертуры 25 мм.

Банчер имеет два зазора длиной 20 мм, три трубки дрейфа длиной соответственно 45, 40, 45 мм. Максимальное поле в зазоре не должно превышать 67 кВ/см, при этом выполняется условие для максимальной напряженности поля на поверхности трубок дрейфа $E_{\text{max}} \leq 1,8 K_p$.

На рис. 5 изображены огибающие пучка в канале МЕВТ1. Градиенты магнитных линз равны соответственно $-29,1$; $24,5$; $-27,9$; $20,3$ Тл/м, что меньше максимально допустимого значения 32 Тл/м. Амплитуды электрических полей в зазорах для первого банчера составляет со-

ответственно 22 кВ/см, а для второго – 45 кВ/см, при этом нет превышения максимальной напряженности на поверхности электродов. Канал обеспечивает прохождение частиц без потерь, т. е. величина транспорта = 100 %. Все частицы, дошедшие до конца МЕВТ1, сгруппированы около синхронной частицы, т. е. ускорены, и величина трансмиссии = 100 %.

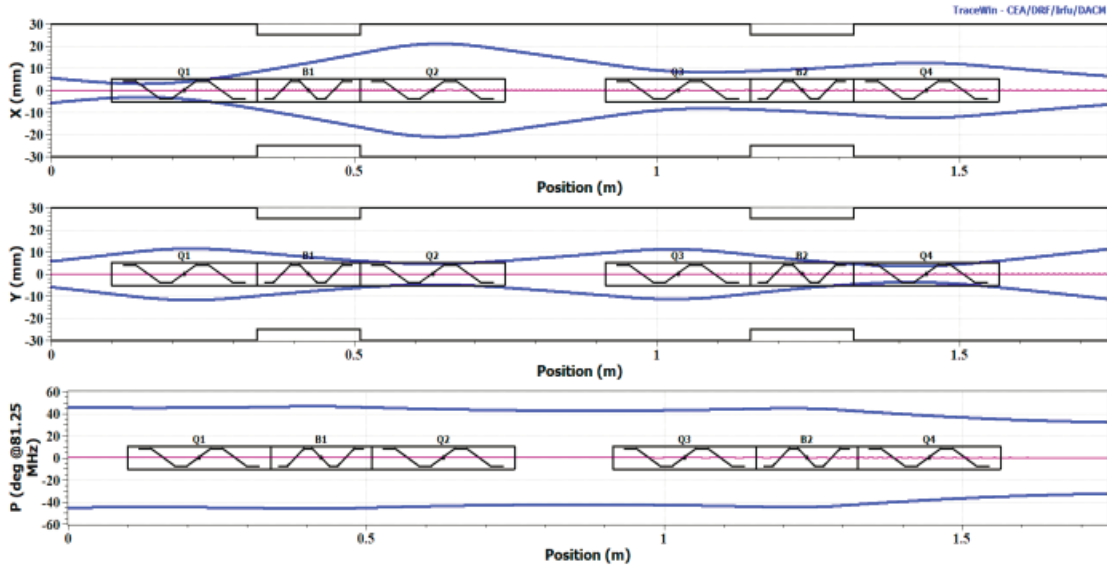


Рис. 5. Огибающие пучка для канала МЕВТ1

Fig. 5. Beam envelopes for the MEBT1

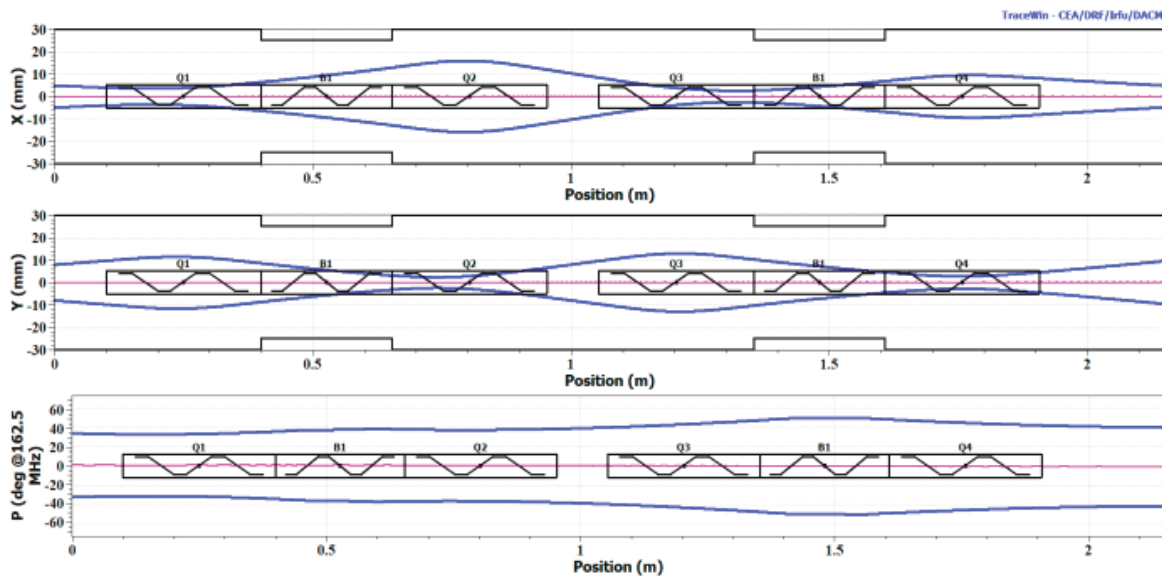


Рис. 6. Огибающие пучка для канала МЕВТ2

Fig. 6. Beam envelopes for the MEBT2

МЕВТ2 состоит из четырех квадрупольных магнитных линз, обеспечивающих четырехмерное поперечное согласование, а также двух двухзачерных банчеров для продольного согласования. Необходимым условием эффективной работы канала МЕВТ2 является обеспечения требуемой величины аксептанса, которая не должна быть меньше величины аксептанса последующей секции DTL1, т. е. не меньше $8,1 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Общая длина канала МЕВТ1 составляет

2 150 мм. Основные параметры предполагаемой магнитной квадрупольной линзы [12]: длина линзы в пространстве – 170 мм, радиус апертуры по пучку – 30 мм, максимальный градиент – 38 Тл/м, область, занимаемая магнитным полем линзы, составляет практически 300 мм.

Каждый банчер имеет длину 254 мм и радиус апертуры 25 мм. Банчер имеет два зазора длиной 40 мм, три трубки дрейфа длиной соответственно 35, 104, 35 мм. Максимальное поле в зазоре не должно превышать 100 кВ/см.

На рис. 6 изображены огибающие пучка в канале МЕВТ2. Градиенты магнитных линз меньше максимально допустимого значения 38 Тл/м. Амплитуды электрических полей в зазорах обоих банчеров составляют 90 кВ/см, при этом нет превышения максимальной напряженности на поверхности электродов. Величина транспорта и трансмиссии – 100 %.

В каналах транспортировки МЕВТ1 и МЕВТ2 определено место размещения элементов диагностики: цилиндр Фарадея; индукционный датчик; измеритель положения пучка; измеритель эмиттанса; измеритель профиля пучка.

Рассмотрим эволюцию поперечного эмиттанса вдоль всего ускорителя ЛУ2. При инжекции в RFQ величина эмиттанса составляет $2 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. На выходе RFQ эмиттанс равен $2,4 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, т. е. рост эмиттанса на RFQ составляет 1,2. Рост эмиттанса в канале МЕВТ1 – 1,03. На выходе DTL1 эмиттанс равен $2,65 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, так что рост эмиттанса в канале DTL1 составляет 1,11. Рост эмиттанса в канале МЕВТ2 – 1,02. На выходе DTL2 эмиттанс равен $3,02 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, так что рост эмиттанса в канале DTL2 составляет 1,14. Превышение роста эмиттанса в DTL2 по сравнению с DTL1 можно объяснить существенным отличием по длине канала. Таким образом, рост эмиттанса в ускорителе ЛУ2 составляет 1,5.

Заключение

Предлагаемая схема ускорителя для тяжелых ионов ЛУ2 включает:

- структуру RFQ на частоте 40,625 МГц, где происходит формирование пучка из непрерывного в отдельные сгустки и подготовка для его дальнейшего перезахвата в последующей ускоряющей структуре DTL1. В предлагаемом канале RFQ удастся достичь транспорта = 100 % и трансмиссии 99,4 %;
- канал МЕВТ1, в котором осуществляется 6-мерное согласование между RFQ и DTL. МЕВТ1 содержит четыре магнитные квадрупольные линзы (согласующий квадруплет), а также два двухззорных банчера;
- секцию DTL1 на частоте 81,25 МГц, которая состоит из цепочки отдельных, индивидуально фазированных 2-ззорных ускоряющих четвертьволновых резонаторов с фокусировкой электромагнитными квадрупольными, размещаемыми между этими резонаторами. Периоды фокусировки имеют строение ФОДО. Данная секция обеспечивает 100%-й транспорт и 100%-ю трансмиссию пучка, поступающего из RFQ;
- канал МЕВТ2, в котором осуществляется 6-мерное согласование между DTL1 и DTL2. МЕВТ2 содержит четыре магнитные квадрупольные линзы (согласующий квадруплет), а также два двухззорных банчера;
- секцию DTL2 на частоте 162,5 МГц, которая состоит из цепочки отдельных, индивидуально фазированных 5-ззорных ускоряющих ИР-резонаторов с фокусировкой электромагнитными квадрупольными, размещаемыми между этими резонаторами. Периоды фокусировки имеют строение ФОДО. Данная секция обеспечивает 100%-й транспорт и 100%-ю трансмиссию пучка, поступающего из DTL1;
- во всех секциях ускорителя выполняется соотношение аксептанса канала к эмиттансу пучка, равное 3;
- во всех секциях ускорителя выполняется ограничение по максимальной напряженности электрического поля на поверхности электродов или трубок дрейфа ($K_p = 1,8$);

Ускоритель, разработанный по предложенной схеме, позволяет работать на кратных частотах: 40,6254 81,25 и 162,5 МГц в импульсном режиме и ускорять тяжелые ионы $4 \leq A/Z \leq 8$ с номинальным током 10 мА до энергии 4 МэВ/нуклон при общей трансмиссии 99,4 % и общим ростом эмиттанса 1,5.

Список литературы

1. **Завьялов Н. В.** Исследовательские установки РФЯЦ–ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // *Успехи физических наук*. 2021. Т. 191, № 9.
2. **Капчинский И. М.** Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982. С. 130–144.
3. **Ситников А. Л. и др.** Моделирование электродинамических характеристик ускоряющего двухзазорного резонатора с трубками дрейфа // *ПТЭ*. 2024 (в печати).
4. **Ситников А. Л. и др.** Моделирование электродинамических характеристик ускоряющего пятизазорного резонатора с трубками дрейфа // *ПТЭ*. 2024 (в печати).
5. **Тепляков В. А.** Исследование возможности создания начальной части ускорителя непрерывного режима на энергию 5 МэВ. Протвино, 2000.
6. **Рошаль А. С.** Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.
7. **Uriot D., Pichoff N.** Status of TraceWin Code, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, pp. 92–94.
8. **Wadlinger E. A.** Scaling Laws for RFQ Design Procedures, Proc. PAC 1985, Vancouver, British Columbia, May 13–16, 1985, pp. 2596–2598
9. **Kulevoy T. et al.** Compact Multipurpose Facility – BELA, in ProcLINAC 2018, Beijing, China, pp. 349–351.
10. **Butenko A. V. et al.** Commissioning of New Proton and Light Ion Injector for Nuclotron – NICA. Proceeding of IPAC 2016, Busan, Korea, pp. 941–941.
11. **Баранова Л. А., Явор С. Я.** Электростатические электронные линзы. М.: Наука, 1986.
12. **Кильметова И. В. и др.,** Магнитные элементы низкоэнергетичного канала для ускорителя тяжелых ионов // *ПТЭ*. 2024 (в печати).

References

1. **Zavyalov N. V.** Research facilities of the RFNC-VNIIEF for the experimental acquisition of fundamental and applied knowledge in the field of nuclear, radiation physics and physics of fast processes. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2021, vol. 191, no. 9.
2. **Kapchinsky I. M.** Theory of linear resonant accelerators. Moscow, Energoizdat publ., 1982, pp. 130–144.
3. **Sitnikov A. L. et al.** Simulation of electrodynamic characteristics of the accelerating 2-gap resonator with drift tubes. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print).
4. **Sitnikov A. L. et al.** Simulation of electrodynamic characteristics of the accelerating 5-gap resonator with drift tubes. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print).
5. **Teplyakov V. A.** Study of the possibility of creating the initial part of a continuous-mode accelerator with an energy of 5 MeV, Protvino, 2000.
6. **Roshal A. S.** Modeling of charged beams. Moscow, Atomizdat publ., 1979.
7. **Uriot D., Pichoff N.** Status of TraceWin Code, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, pp. 92–94.
8. **Wadlinger E. A.** Scaling Laws for RFQ Design Procedures, Proc. PAC 1985, Vancouver, British Columbia, May 13–16, 1985, pp. 2596–2598

9. **Kulevoy T. et al.** Compact Multipurpose Facility – BELA', in ProcLINAC2018, Beijing, China, pp. 349-351
10. **Butenko A. V. et al.** Commissioning of New Proton and Light Ion Injector for Nuclotron – NICA. Proceeding of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 941–941.
11. **Baranova L. A., Yavor S. Ya.** Electrostatic electron lenses. Moscow, Nauka publ., 1986.
12. **Kilmetova I. V. et al.** Magnetic elements of a low-energy channel for a heavy-ion accelerator. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print).

Сведения об авторах

Кропачев Геннадий Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук, зам. руководителя ККТЭФ по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам

Ситников Алексей Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Скачков Владимир Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Хабибуллина Екатерина Рамисовна, младший научный сотрудник

Сметанин Максим Львович, заместитель начальника научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела, РФЯЦ – ВНИИЭФ

Тельнов Александр Валентинович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора ИЯРФ по радиационным комплексам – начальник научно-исследовательского отделения РФЯЦ – ВНИИЭФ

Завьялов Николай Валентинович, доктор физико-математических наук, директор ИЯРФ, РФЯЦ – ВНИИЭФ

Information about the Authors

Gennady N. Kropachev, Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Leading Researcher

Timur V. Kulevoy, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Head of KCTEP for applied scientific research and experimental installations

Alexey L. Sitnikov, Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher

Vladimir S. Skachkov, Ph.D. in Engineering Sciences, Senior Researcher

Ekaterina R. Khabibullina, Junior Researcher

Maxim L. Smetanin, Deputy Head of the Research Department – Head of the Research Department

Alexander V. Telnov, Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Deputy Director of the Institute of Nuclear Physics for Radiation Complexes – Head of the Research Department

Nikolay V. Zavyalov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Institute of Nuclear Physics

*Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 05.03.2024*