

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА ИОНОВ КИСЛОРОДА В РЕГУЛЯРНОЙ СЕКЦИИ УСКОРИТЕЛЯ-ИНЖЕКТОРА НА 7.5 МэВ/НУКЛОН

© 2024 г. Т. А. Лозеева^а, *, В. С. Дюбков^а, Р. А. Осин^а, С. М. Полозов^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: TALozeeva@mephi.ru

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 12.07.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

В статье представлены результаты моделирования динамики пучка кислорода 5^+ в регулярной секции ускорителя-инжектора ЛУ-1 на энергию 7.5 МэВ/нуклон. Линейный ускоритель ЛУ-1 включает в себя несколько ионных источников, ускоряющую секцию с пространственно-однородной фокусировкой (ПОКФ) и две группы идентичных ускоряющих резонаторов типа ИН (Interdigital H-type). Транспортировка пучка между ускоряющими секциями осуществляется с помощью каналов транспортировки пучка на низких (ЛЕВТ), средних (МЕВТ1 и МЕВТ2) и высоких энергиях (НЕВТ); последний канал служит для отведения пучка в бустерный синхротрон или сброса пучка в нагрузку. Приведены результаты расчетов динамики пучка кислорода 5^+ с $A/Z = 3.2$ в ускоряющих и транспортирующих секциях ускорителя ЛУ-1.

Ключевые слова: ускорители частиц, пучки ионов, динамика пучков частиц

DOI: 10.56304/S2079562923030247

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России создается новый синхротронный ускорительный комплекс [1]. Кроме бустерного и накопительного синхротронов, ускорительный комплекс будет включать в себя два линейных ускорителя-инжектора: ЛУ-1 для ускорения протонов и легких ионов и ЛУ-2 для ускорения тяжелых ионов. Ускоритель ЛУ-1 был спроектирован согласно тенденциям последнего десятилетия. Он включает два ионных источника — ЭЦР источник для получения протонов и лазерный источник для получения других сортов легких ионов от лития до кислорода с A/Z до 3.2. Все типы ионов необходимо ускорять до энергии 7.5 МэВ/нуклон. Начальная ускоряющая секция с ПОКФ работает на частоте 81.25 МГц и ускоряет пучки до 0.82 МэВ/нуклон, далее пучок попадает в регулярную секцию, состоящую из двух групп ИН резонаторов с геометрическими скоростями 0.057с и 0.099с. Между ускоряющими секциями пучок переводится с помощью каналов транспортировки на низких, средних и высоких энергиях пучка, состоящих из квадрупольных, соленоидов и трех дипольных магнитов. Все расчеты были произведены с помощью программы моделирования динамики пучков ионов BEAMDULAC [2–4], разработанной в МИФИ на кафедре Электрофизических установок; верификация результатов

расчетов программы проводилась с помощью известных программ TraceWin [5] и Trace 3D [6].

2. КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА НА НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ

Поскольку не существует данных измерений реального эмиттанта пучков, выходящих с источников, была разработана предварительная структура канала транспортировки ЛЕВТ для пучков протонов с энергией 80 кэВ и для пучков других сортов ионов с энергией 40 кэВ/нуклон. Более ранняя версия ЛЕВТ для транспортировки пучков протонов, гелия и других легких ионов представлена в [7]. Позже было решено использовать только два типа ионных источников вместо трех: лазерный и ЭЦР на рабочей частоте 2450 МГц. Схема ЛЕВТ для варианта с двумя источниками ионов приведена на рис. 1. Канал имеет две ветви и включает в себя сводящий дипольный магнит, группирователь на частоте 81.25 МГц, 16 квадрупольных линз, два коротких соленоида и оборудование для диагностики профиля, тока и эмиттанта пучка. Длина прямой ветви ЛЕВТ составляет около 7 м, а длина боковой ветви — 6.5 м. При моделировании использовались начальные фазовые распределения пучков на рис. 2, нормализованные эмиттансы полагались равными 0.2π -мм мрад

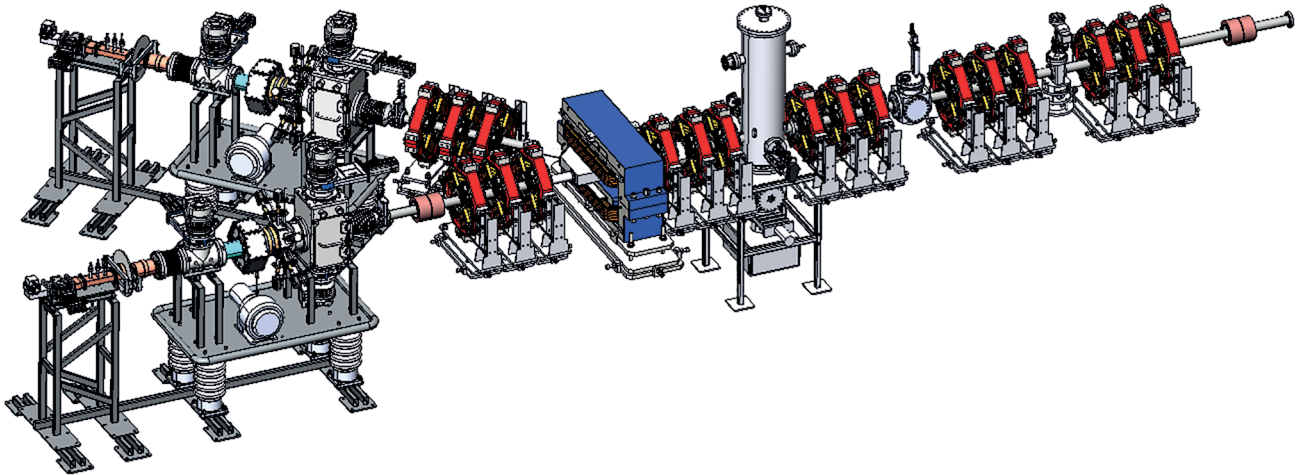


Рис. 1. Схема LEVT.

для 8 мА пучка протонов и 2 мА пучка ионов гелия и 0.08 п-мм мрад для 2 мА пучка пятизарядного кислорода. Фазовые распределения на выходе LEVT представлены на рис. 3. Коэффициент передачи пучка для ионов гелия не менее 75%, а для протонов и других легких ионов — 86%. Основной сложностью при разработке LEVT является продольное расхождение пучка, появляющееся из-за длины канала. Также были разработаны предварительные схемы каналов транспортировки на средних энергиях МЕВТ1 и МЕВТ2 [7].

3. СЕКЦИЯ С ПОКФ

Четырех-электродный семи-секционный резонатор с ПОКФ на рабочей частоте 81.25 МГц используется в качестве начальной секции и ускоряет частицы от 40 кэВ/нуклон до 0.82 МэВ/нуклон. Более подробная информация о резонаторе с ПОКФ приведена в работе [1]. Здесь мы ограничимся следующими данными: коэффициент передачи пучка для кислорода близок к 100% с коэффициентом захвата 87.7%. Для пучка ионов гелия коэффициент передачи пучка составляет 98.7% с захватом 86.7% частиц. Все результаты были получены в случае, когда группирователь перед секцией с ПОКФ выключен.

4. ДИНАМИКА ПУЧКА В РЕГУЛЯРНОЙ СЕКЦИИ

Регулярная секция ускорителя ЛУ-1 начинается с канала транспортировки пучка средних энергий МЕВТ1 и заканчивается каналом транспортировки пучка высоких энергий НЕВТ. МЕВТ1 состоит из трех квадрупольных дублетов с переменным градиентом для транспортировки различных типов ионов. В существующих моделях квадру-

польных линз предполагается, что приемлемый тепловой режим работы осуществляется, когда градиент магнитного поля в линзе не превышает 18 Тл/м. Для транспортировки ионов кислорода именно это значение градиента было положено граничным для всех линз ЛУ-1.

В канале транспортировки МЕВТ1 также установлен группирователь пучка, работающий на основной частоте ускорителя и рассчитанный на геометрическую скорость 0.042с. Напряжение на группирователе для работы с пучком кислорода выбрано равным 132 кВ, поскольку обеспечивает наилучшее продольное согласование пучка со следующей ускоряющей секцией ИН-1. На рис. 4–5 приведено фазовое распределение пучка кислорода 5+ на входе в МЕВТ1 и поперечные огибающие пучка вдоль канала. Потери ореольных частиц пучка, вызванные разницей апертур вакуумного тракта и четвертьволнового резонатора-группирователя составили около 0.01%.

Первая группа ИН резонаторов состоит из шести одинаковых резонаторов [8–12], разделенных квадрупольными дублетами. Каждый резонатор работает на частоте 81.25 МГц и рассчитан на геометрическую скорость равную 0.0571с. Динамика пучков частиц в таких системах, состоящих из коротких независимо фазуемых резонаторов с фиксированной фазовой скоростью, приблизительно равной скорости пучка в центре группы, отличается от динамики пучка в ускорителях с трубками дрейфа, где фазовая скорость увеличивается синхронно со скоростью пучка. В такой системе частица, которая могла бы двигаться синхронно с эквивалентной ускоряющей волной, отсутствует на протяжении всей длины группы. Таким образом, концепция фиксированной синхронной фазы здесь не вполне применима, поскольку “квази-синхронная” частица претерпевает фазовое скольжение от-

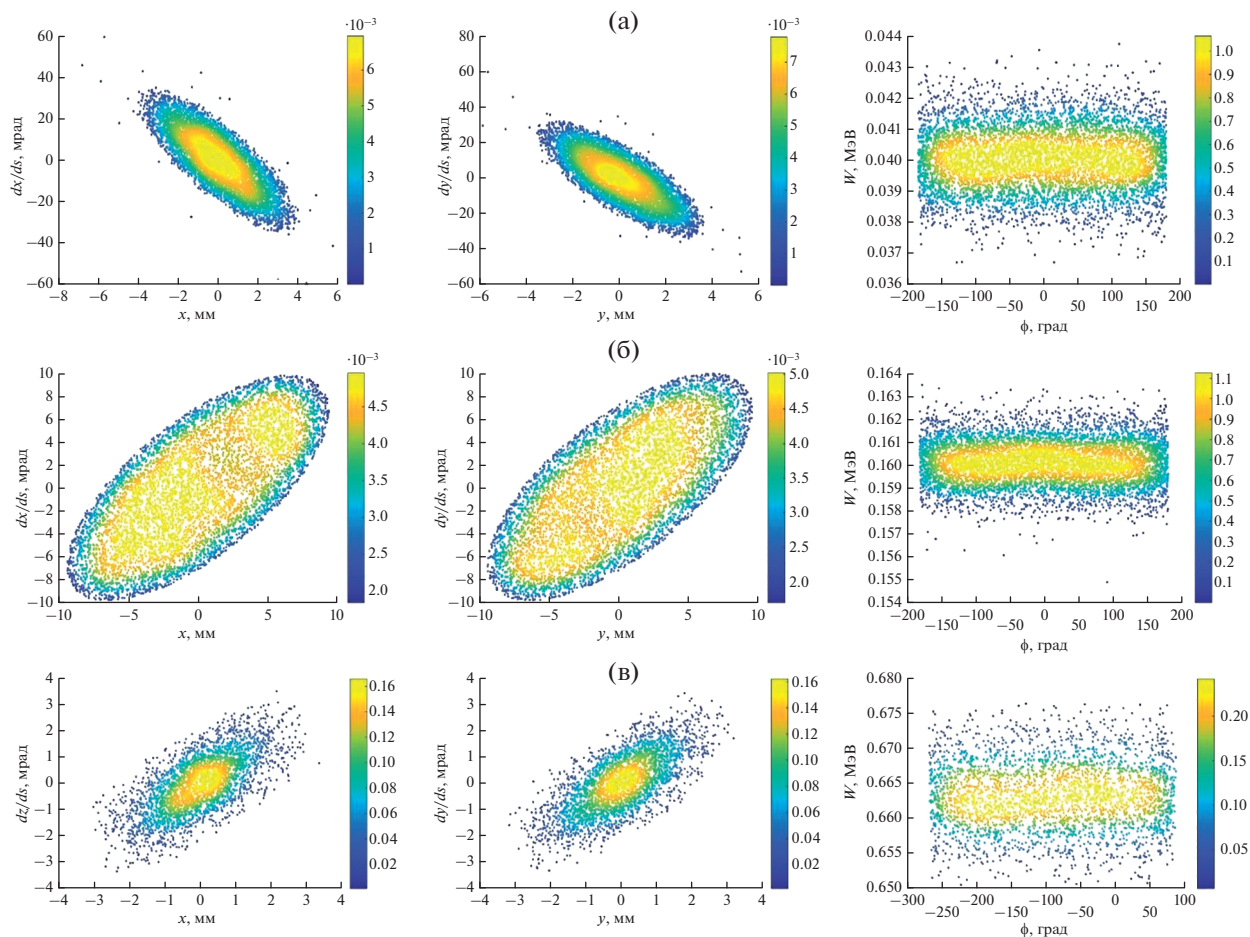


Рис. 2. Входные фазовые распределения для (а) протонов, (б) ионов гелия, (в) ионов кислорода 5^+ .

носителем эквивалентной волны. Это фазовое скольжение, связанное со значением времяпролетного фактора (Transit Time Factor), оказывает влияние на продольную и поперечную устойчивость пучка и должно быть ограничено. В случае ЛУ-1 минимальное значение времяпролетного фактора опущено до значения 0.6 (пролетный фактор поддерживают близким к единице в традиционных линейных ускорителях с пролетными трубками) чтобы снизить количество групп резонаторов и уменьшить стоимость ускорителя.

На рис. 6 приведена эволюция продольного фазового портрета пучка при ускорении в группе ИН-1. Эта группа должна ускорять все сорта ионов с 0.82 до 2.5 МэВ/нуклон с помощью резонаторов, имеющих на оси напряжение 1.5 МВ для ионов кислорода. Напряжение в резонаторах ограничено пиковой напряженностью электрического поля на поверхности резонатора и критерием высокочастотного пробоя Килпатрика [13]. Значения квази синхронных фаз в центрах резонаторов отличаются от используемых традиционно 20° – 40° . Рисунок изменения квази-синхронной фазы от

резонатора к резонатору на рис. 7 подобран таким образом, чтобы обеспечивать наименьшие потери ореольных частиц пучка при сохранении высокого темпа ускорения и поперечной устойчивости. К примеру, положительные и близкие к нулю значения квази-синхронных фаз гарантируют меньшее влияние дефокусирующих полей резонаторов и, следовательно, более низкие градиенты квадрупольных линз. Потери пучка в группе ИН-1 составляют около 1.8% (рис. 8), а плотность потерь не превышает традиционного значения 1 В/м.

После секции ИН-1 пучок попадает во второй канал транспортировки пучка низких энергий МЕВТ2, который так же включает в себя три квадрупольных дублета и группирователь с напряжением 500 кВ для кислорода для продольного согласования сгустка со следующей группой резонаторов. Потери пучка в данной секции составили около 0.09%.

Группа ИН-2 позволяет ускорять пучки от 2.5 до 7.5 МэВ/нуклон и состоит из восьми одинаковых ИН резонаторов с напряжением на оси

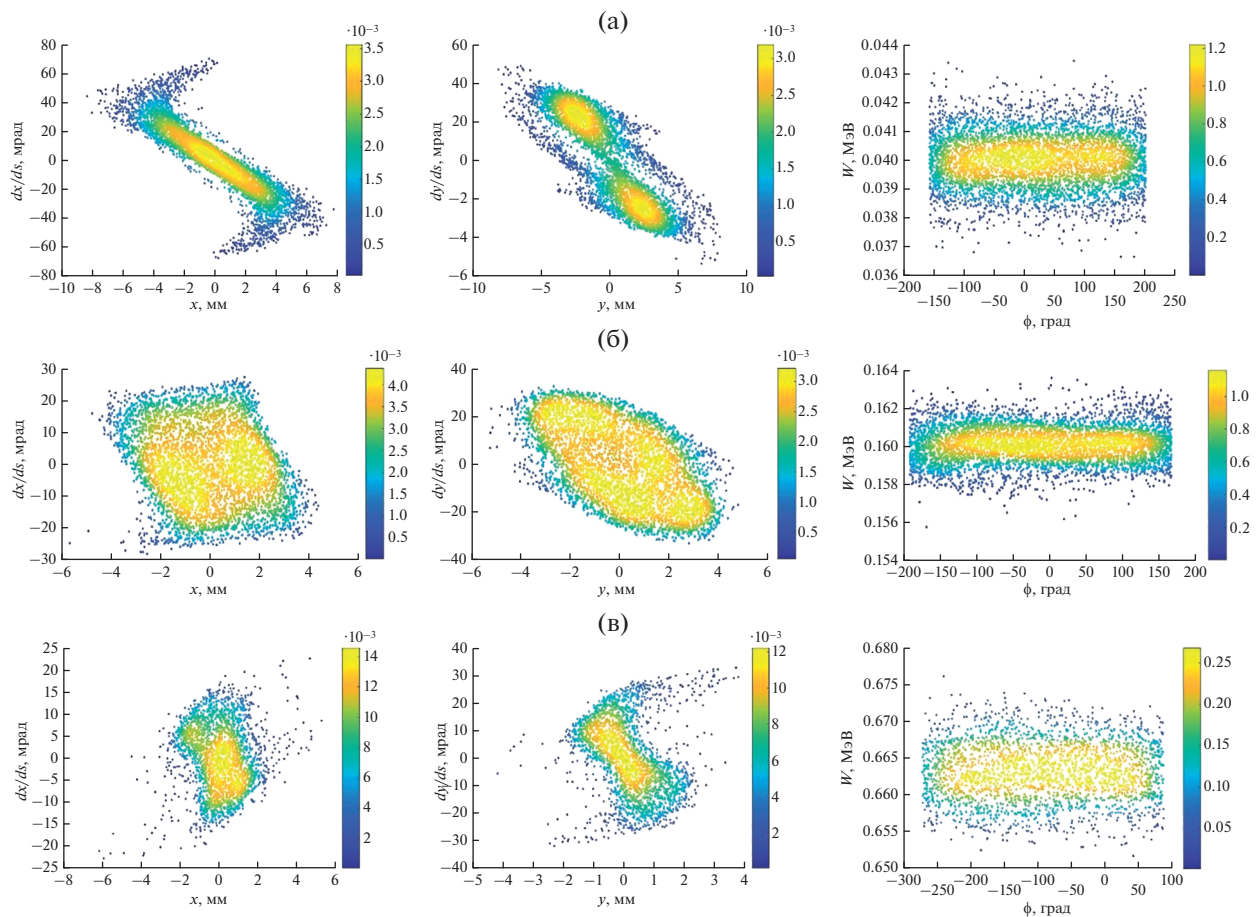


Рис. 3. Выходные фазовые распределения для (а) протонов, (б) ионов гелия, (в) ионов кислорода 5^+ .

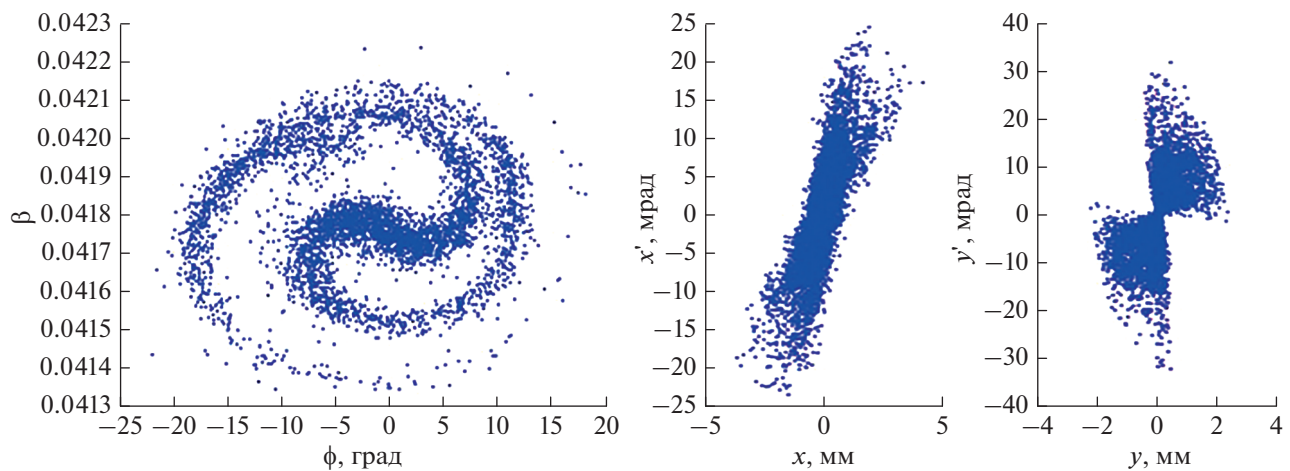


Рис. 4. Выходные фазовые распределения пучка кислорода на выходе секции с ПОКФ.

2.95 МВ для кислорода. Огибающие пучка схожи с огибающими в предыдущей группе ИН-1 (рис. 8), а потому не приведены. Квази-синхронная фаза также меняется похожим образом от 15° в

первом резонаторе до близких к нулю значений в конце группы. Около 7% пучка будет потеряно при ускорении во второй группе из-за сильного влияния дефокусирующих полей при данных напря-

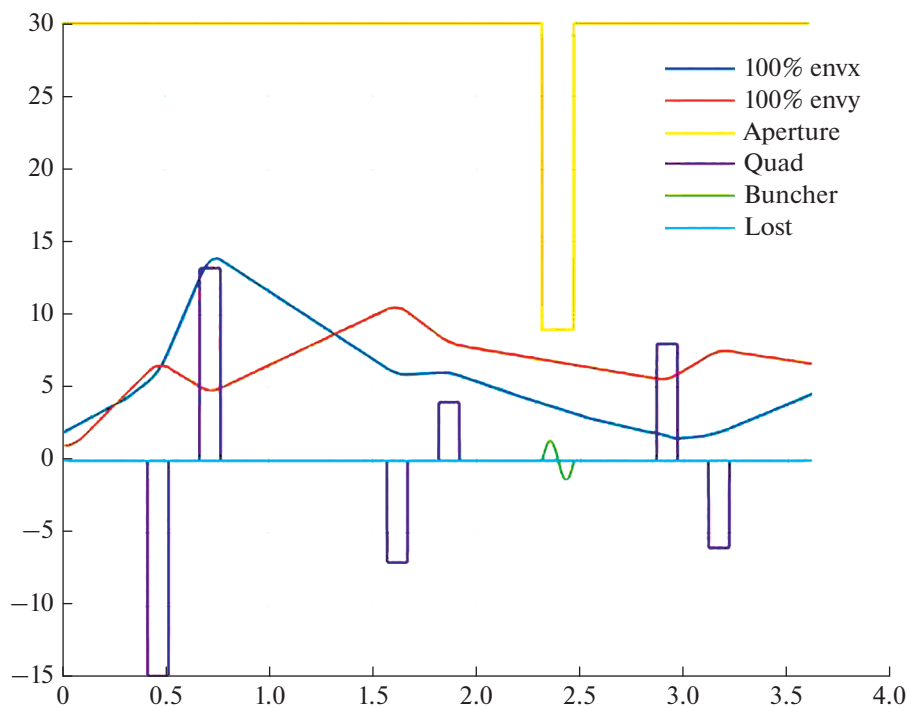


Рис. 5. Поперечные огибающие пучка кислорода в канале транспортировки MEVT1 по 100% частиц.

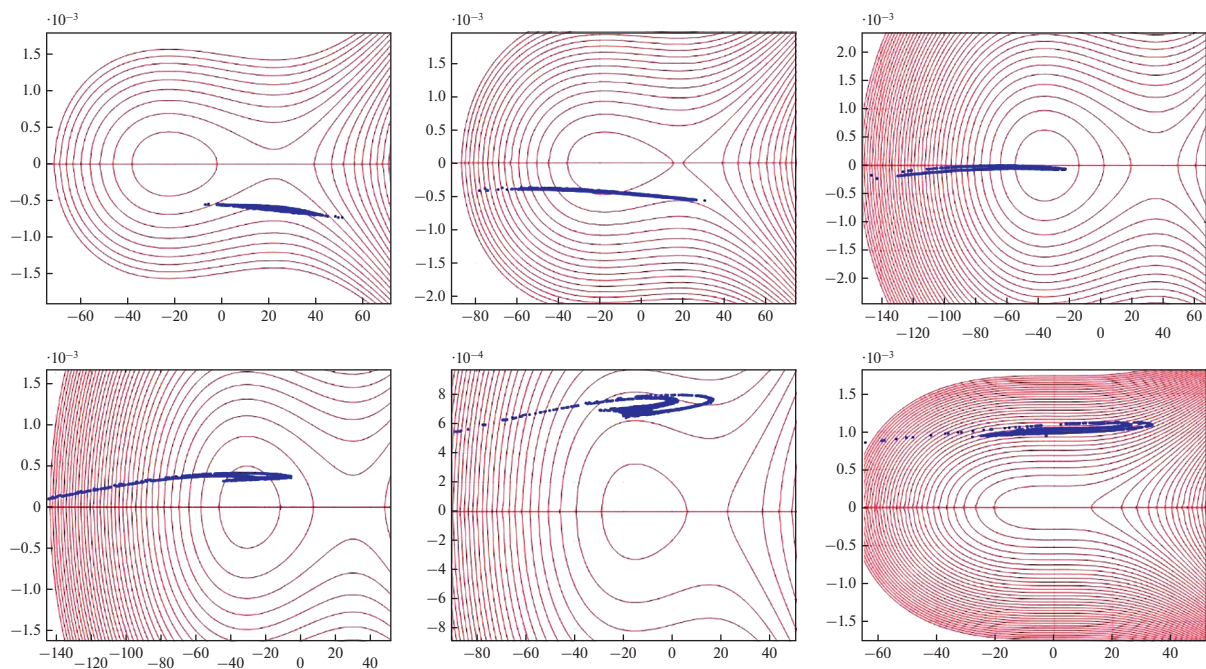


Рис. 6. Эволюция продольного фазового распределения пучка кислорода в группе ИН-1 в системе, движущейся с эквивалентной волной.

жениях. Также во второй группе становится более заметным еще один эффект: особенность ИН резонаторов заключается в том, что они обладают ненулевыми компонентами E_y и H_x электрическо-

го и магнитного полей на оси резонатора. Действие этих компонент приводит к смещению пучка с пролетной оси и дополнительному “разбуханию”. Чтобы избежать этого эффекта, пролетные трубки ИН

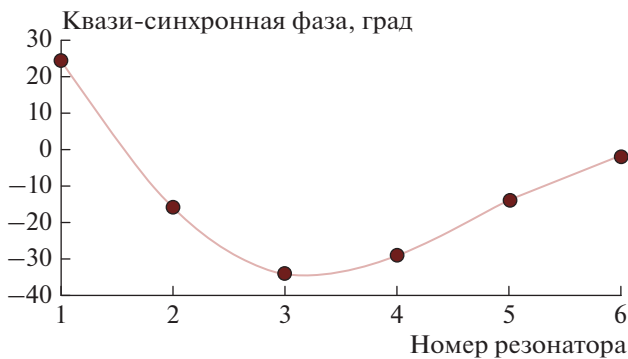


Рис. 7. Квази-синхронная фаза в центрах резонаторов группы ИН-1.

резонаторов обычно делаются достаточно толстыми, или имеют компенсационные кольца или скосы, но такие меры ведут к уменьшению шунтового сопротивления резонаторов.

Максимальное отклонение пучка кислорода под действием поперечных компонент полей на оси составляет 4 мм и локализуется во втором резонаторе группы ИН-2. Для подавления этого смещения предлагается использовать две дополнительные пары дипольных корректоров с полями 0.07 и -0.09 Тл, установленных после первого резонатора в обеих группах. Коррекция траектории

позволила стабилизировать пучок и снизить поперечные потери на 2%. Однако, поперечные нормализованные эмиттансы пучка кислорода продолжают практически вдвое расти на длине обеих групп из-за вышеупомянутых эффектов (рис. 9).

5. КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА НА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Схема канала транспортировки пучка на высоких энергиях НЕВТ приведена на рис. 10. Этот канал используется для согласования пучка и транспортировки его в бустерный синхротрон. На концах канала установлены согласующие квадрупольные дублеты, также пучок проходит через два секторных диполя, пять дублетов и дегруппирователь пучка для инъекции в синхротрон. В НЕВТ также предусмотрена возможность отвода пучка в нагрузку вместо канала инъекции синхротрона.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Линейный ускоритель-инжектор ЛУ-1 был разработан для ускорения ионов различных типов с A/Z от 1 до 3.2 до энергии 7.5 МэВ/нуклон. В качестве начальной секции используется резонатор с ПОКФ на частоте 81.25 МГц, в регулярной секции установлено 14 нормально-проводящих ИН резонаторов с той же рабочей частотой. Схема ускорения была оптимизирована для получения наименьших потерь пучка, суммарные потери от

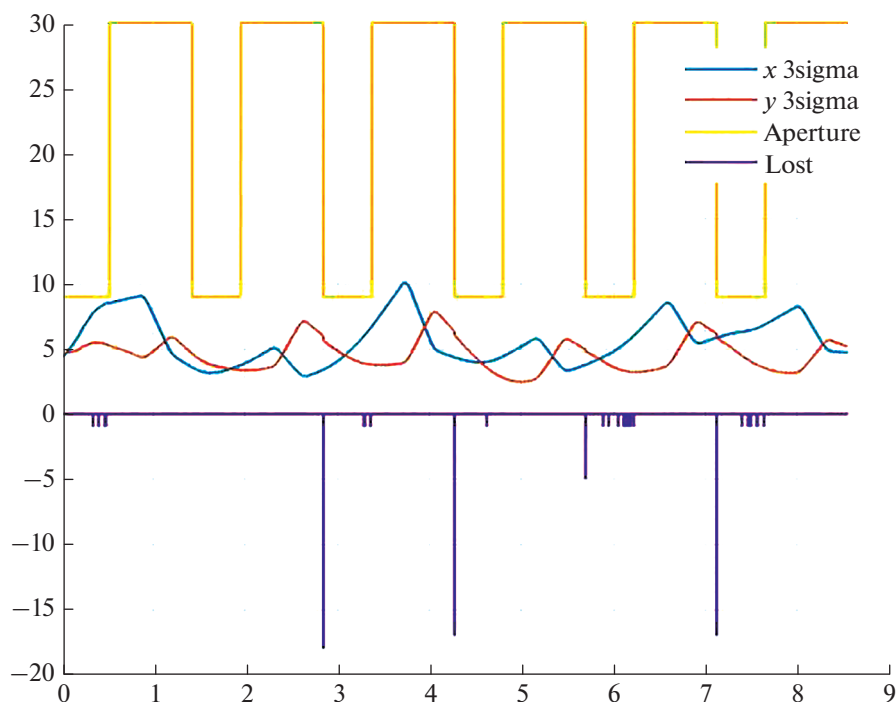


Рис. 8. Поперечные отклонения пучка кислорода в секции ИН-1 по 98% частиц.

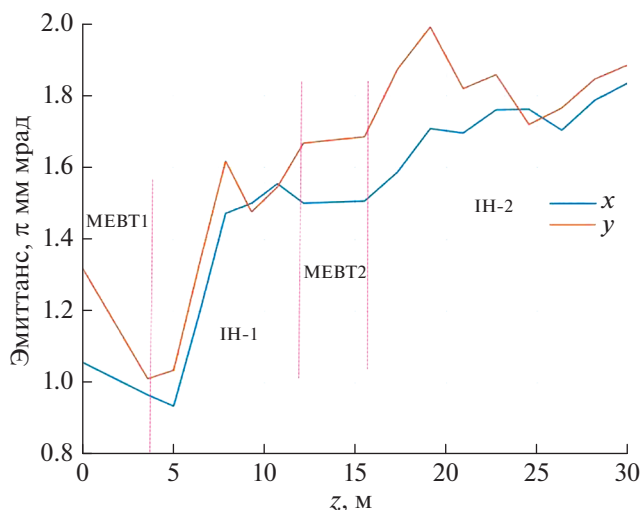


Рис. 9. Рост поперечных нормализованных эмиттансов в регулярной секции ЛУ-1.

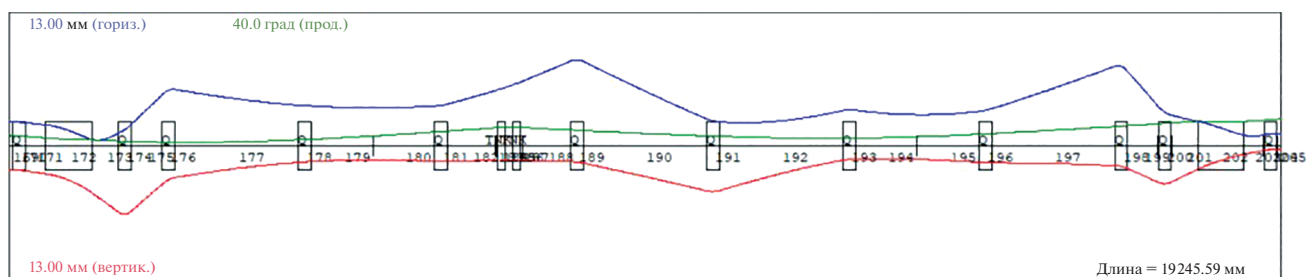


Рис. 10. Схема HEVT и огибающие пучка кислорода.

источника до инъекции в бустерный синхротрон не превышают 20% для пучка кислорода. Плотность потерь пучка на всей длине ускорителя не превышает 1 В/м. ИР резонаторы оптимизированы для работы с напряжениями 1.5 и 2.95 МВ с приемлемыми значениями шунтовых сопротивлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Polozov S.M. et al. // Proc. RuPAC'21. 2021. P. 51. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB07>.
2. Масунов Е.С., Полозов С.М. // ВАНТ. Сер.: ядерно-физич. исслед. 2006. № 3 (47). С. 119.
3. Masunov E.S. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2006. V. 558 (1). P. 184.
4. Samoshin A.V. // Proc. LINAC2012. 2012. P. 630.
5. Uriot D., Pichoff N. // Proc. 6th Intl. Particle Accelerator Conf. (IPAC'15). 2015. P. 92. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-MOP-WA008>
6. Crandall K. and Rusthoi D. Report LA-UR-90-4146. 1990. Los Alamos National Laboratory.
7. Dyubkov V.S. // Proc. RuPAC'21. 2021. P. 355.
8. Bres M. et al. // Part. Accel. 1971. V. 2. P. 17.
9. Weis T., Klein H., Schempp A. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1983. V. 30 (4). P. 5348.
10. Kurennoy S., Rybarcyk L., Wangler T. // Proc. PAC'07. 2007. P. 3824.
11. Kurennoy S., O'Hara J., Rybarcyk L. // Proc. HB. 2008. P. 428.
12. Горчаков А.А. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (3). С. 304 [Gorchakov A.A. et al. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84 (12). P. 2018].
13. Kilpatrick W.D. // Rev. Sci. Instrum. 1957. V. 28 (10). P. 824. <https://doi.org/10.1063/1.1715731>

Oxygen Ion Beam Dynamics Simulation in the 7.5 MeV/u Injector Linac

T. A. Lozeeva^{1, *}, V. S. Dyubkov¹, R. A. Osin¹, and S. M. Polozov¹

¹*National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: TALozeeva@mephi.ru*

Received June 20, 2023; revised July 12, 2023; accepted July 28, 2023

Abstract—The results of the Oxygen 5^+ beam dynamics simulation in the regular section of a 7.5 MeV/u linear accelerator are presented. Linear accelerator LU-1 consists of several ion sources, RFQ section (Radio Frequency Quadrupole) and two groups of identical IH (Interdigital H-type) cavities. Beam transport between the accelerating sections is done via low energy (LEBT) line, two medium energy MEBT-1 and MEBT-2 lines, and high energy (HEBT) line that transfers the beam to the booster synchrotron or a beam dump. This paper contains the results on Oxygen 5^+ $A/Z = 3.2$ beam dynamics end-to-end simulation in the LU-1 sections (LEBT, RFQ, MEBT-1, MEBT-2 beam transport lines and both groups of IH cavities).

Keywords: particle accelerators, ion beams, ion beam dynamics