

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО НОВОМУ СВЕРХПРОВОДЯЩЕМУ ЛИНЕЙНОМУ УСКОРИТЕЛЮ ДЛЯ КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН–НИСА

*А. А. Бакиновская^а, М. А. Батурицкий^б, Т. А. Бахарева^а, А. В. Бутенко^з,
М. А. Гусарова^{а, з}, С. Е. Демьянов^д, Н. Э. Емельянов^з, В. Г. Залесский^а,
В. Л. Звягинцев^{а, е}, В. А. Карпович^б, Т. В. Кулевой^{б, ж}, А. А. Кураев^з,
М. В. Лалаян^{а, з}, Ю. Ю. Лозев^а, С. А. Максименко^б, В. В. Матвеев^з,
С. В. Мацневский^а, В. С. Петраковский^а, И. Л. Поболь^а,
А. И. Покровский^а, С. М. Полозов^а, А. И. Проников^а, А. Рак^з,
В. Н. Родионова^б, А. В. Самошин^а, А. О. Сидорин^{з, и, 1}, Н. П. Собенин^а,
Д. В. Сурков^а, Е. М. Сыресин^з, К. В. Талецкий^а, Г. В. Трубников^{з, и},
В. Л. Шатохин^{а, з}, Д. А. Шпарло^а, С. В. Юревич^а*

^а Физико-технический институт НАНБ, Минск

^б Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск

^в Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

^г Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^д Научно-практический центр по материаловедению НАНБ, Минск

^е Канадский ускорительный центр TRIUMF, Ванкувер, Канада

^ж Институт теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

^з Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

^и Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Коллаборация ОИЯИ, НИЯУ МИФИ, ИЯП БГУ, ФТИ НАНБ, БГУИР и НПЦ НАНБ по материаловедению, созданная в 2015 г., начала разработку нового линейного ускорителя-инжектора для комплекса нуклотрон–НИСА. Цель проекта — освоение технологий производства сверхпроводящих ускоряющих резонаторов и создание ускорителя для пучка протонов с энергией до 25 МэВ и легких ионов с энергией до 7,5 МэВ/нуклон. В статье представлены последние результаты проработки общей концепции ускорителя с учетом параметров резонаторов и технологических возможностей производства, моделирования динамики пучка и разработки сверхпроводящих резонаторов.

The new collaboration of JINR, NRNU MPhI, INP BSU, PTI NASB, BSUIR and SPMRC NASB started in 2015 the project of SC linac-injector design for Nuclotron–NICA. The goal of the new linac is to accelerate protons up to 25 MeV and light ions to ~ 7.5 MeV/u. Current results of the linac general design and development taking into account real cavities parameters and technological limitations are presented in this paper. Beam dynamics simulation results in the linac and SC cavities design are also discussed.

PACS: 29.17.w; 29.27.Bd

¹E-mail: sidorin@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

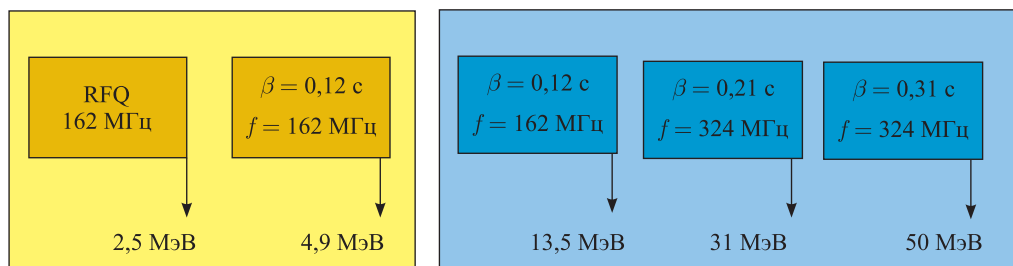
Новый ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility), предназначенный для проведения широкого спектра фундаментальных и прикладных исследований [1], сооружается в ОИЯИ на основе действующего сверхпроводящего (СП) ионного синхротрона нуклотрон. В рамках реализации проекта NICA была проведена частичная модернизация системы инжекции легких ядер в нуклотрон, основным элементом которой является линейный ускоритель (ЛУ) с трубками дрейфа ЛУ-20. В частности, импульсный высоковольтный инжектор был заменен секцией с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), обеспечивающей ускорение ионов с отношением заряда (Z) к массе (A) $0,3 \leq Z/A \leq 1,0$ и током до 20 мА до кинетической энергии 0,156 МэВ/нуклон при коэффициенте токопрохождения не хуже 80% [2, 3]. Новый ускоритель с ПОКФ, запущенный в конце 2015 г., в 2016–2017 гг. был успешно использован при проведении четырех сеансов в составе ускорительного комплекса. В этих сеансах обнаружилось и большое количество проблем, связанных с дальнейшей эксплуатацией самого ЛУ-20. Данный ускоритель был сооружен в ОИЯИ как инжектор синхрофазотрона более 40 лет назад, и к настоящему времени многие его системы серьезно изношены. Для обеспечения надежной работы комплекса на длительную перспективу разрабатывается проект создания нового инжектора для ускорения протонов до энергии 25–30 МэВ [4], ионов дейтерия и легких ядер до энергии не менее 7,5 МэВ/нуклон. Одним из предъявляемых к нему требований является возможность повышения энергии протонов до 50 МэВ при установке дополнительных секций. В настоящее время в мире сложилась тенденция использования СП высокочастотных (СПВЧ) ускоряющих резонаторов как при строительстве новых линейных ускорителей, так и при реконструкции действующих ускорительных комплексов [5, 6]. Достаточно привлекательным представляется использование СПВЧ-резонаторов и при создании нового ускорителя для комплекса NICA.

В связи с отсутствием в России технологий, необходимых для производства СПВЧ-резонаторов, систем их ВЧ-питания (прежде всего твердотельных) и криостатов, в марте 2016 г. была создана российско-белорусская коллаборация, в которую сегодня входят ОИЯИ, НИЯУ МИФИ, ИЯП БГУ, ФТИ НАНБ, БГУИР и НПЦ НАНБ по материаловедению. Коллаборация ставит перед собой две задачи: освоение технологий производства СПВЧ-резонаторов и строительство на их основе первого в России СП линейного ускорителя — нового инжектора для комплекса NICA [4, 7].

1. ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ МОДУЛЬНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Сверхпроводящие ЛУ в настоящее время принято строить по так называемому модульному принципу, состоящему в применении нескольких одинаковых СП-резонаторов для ускорения и СП-соленоидов, расположенных между ними, для фокусировки. При большой длине ускорителя (и высокой энергии на выходе) ускоритель целесообразно разделить на несколько секций, состоящих из одинаковых резонаторов и соленоидов. Для таких установок был разработан комплексный подход к исследованию динамики, включающий несколько аналитических методов и численное моделирование [8, 9]. За время работы над проектом нового СП ЛУ параметры и требования к ускоряющим резо-

наторам и фокусирующим соленоидам несколько раз корректировались с учетом требований к пучку и технологических возможностей изготовителя (ФТИ НАНБ), что повлекло за собой необходимость неоднократной перекомпоновки групп ускоряющих резонаторов и пересчета динамики пучка. Производство СП-резонаторов будет начато только после отработки технологий формовки и сварки резонаторов на медных прототипах. В связи с этим было предложено разместить после начального участка ЛУ, представляющего собой секцию с ПОКФ, несколько нормально проводящих четвертьволновых резонаторов.



Структурная схема нового инжектора для комплекса нуклотрон–NICA

Параметры ускорителя

Параметр	Протоны			Ионы дейтерия		
	0*	1	2	0*	1	2
Номер группы резонаторов	0*	1	2	0*	1	2
Геометрическая скорость β_G	0,12		0,21	0,12		0,21
Частота ВЧ-поля F , МГц	162		324	162		324
Времяпролетный фактор T , %	24,0		24,0	24,0		24,0
Число зазоров N_{gap}	2		$2 \times 2^{**}$	2		$2 \times 2^{**}$
Длина резонатора L_{res} , м	0,222		0,39	0,222		0,39
Длина соленоида L_{sol} , м	0,2		0,2	0,2		0,2
Зазор между резонатором и соленоидом, м	0,1		0,1	0,1		0,1
Длина периода L_{per} , м	0,622		0,79	0,622		0,79
Число периодов N_{per}	3	8	8	3	8	8
Длина секции L , м	1,87	4,98	6,32	1,87	4,98	6,32
Амплитуда ускоряющего поля E_{acc} , МВ/м	4,50	5,86	6,4	4,50	5,86	6,4
Напряжение на резонатор U_{res} , МВ	1,0	1,3	1,25	1,0	1,3	1,25
Фаза влета в первый резонатор Φ , град	-20	-20	-20	-20	-20	-90
Поле соленоида B_{sol} , Тл	1,35	1,3	1,9	1,8	2,0	1,0
Энергия инжекции W_{in} , МэВ	2,5	4,9	13,47	2,5	3,65	8,3
Скорость инжекции β_{in}	0,073	0,102	0,168	0,073	0,088	0,133
Энергия на выходе секции W_{out} , МэВ	4,9	13,47	31,0	3,65	8,3	8,3
Скорость на выходе секции β_{out}	0,102	0,168	0,251	0,088	0,133	0,133

* Нулевая группа состоит из нормально проводящих резонаторов, конструкция и размеры которых полностью эквивалентны СП QWR первой группы.

** Два двухзазорных резонатора и один соленоид на период.

Эти резонаторы будут идентичны по параметрам СП-резонаторам первой группы, но могут быть изготовлены, испытаны и смонтированы в составе нового инжектора намного раньше, чем будут готовы первые серийные СП четвертьволновые резонаторы (QWR).

На рисунке показана общая схема нового ускорителя, которая включает в себя нормально проводящую секцию с ПОКФ на энергию пучка до 2,5 МэВ/нуклон (резонансная частота 162 МГц, длина секции ~ 430 см), «нулевую» и первую группы нормально проводящих и СП четвертьволновых коаксиальных ускоряющих резонаторов (энергия на выходе 4,9 и 13,5 МэВ/нуклон соответственно, резонансная частота 162 МГц (на рисунке геометрическая скорость обозначена символом β), вторую и, при необходимости, третью группы сверхпроводящих ускоряющих резонаторов, типы которых будут выбраны в ближайшее время (рабочая частота — удвоенная 324 МГц, энергия на выходе 31 и 50 МэВ соответственно). По сравнению с предыдущими вариантами компоновки предельно допустимую величину скольжения пришлось увеличить до 24 % [10], что не привело к ухудшению продольной устойчивости пучка. Общая длина ускорителя без секции с ПОКФ и третьей группы СП-резонаторов составила 13,7 м, ускоритель состоит из 27 резонаторов, три из которых — нормально проводящие.

Основные параметры ускорителя, включающего в себя две первые группы резонаторов, приведены в таблице для пучков протонов и ионов дейтерия. Пучок ионов дейтерия достигает запланированной энергии ($> 7,5$ МэВ/нуклон) на выходе первой группы резонаторов и во второй группе только дрейфует без ускорения при включенном для обеспечения поперечной фокусировки магнитном поле соленоидов.

2. РАЗРАБОТКА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

На текущем этапе выполнения проекта основное внимание уделялось разработке четвертьволновых сверхпроводящих резонаторов первой группы. Выбор конструкции резонатора определяется, с одной стороны, требованиями к его основным электродинамическим характеристикам и габаритным параметрам, а с другой — возможностями производства. При изготовлении резонаторов в ФТИ НАНБ предполагается гидроштамповка и сварка в вакууме электронным пучком. В ходе дискуссий было принято решение о рассмотрении в качестве прототипа тестового резонатора конструкций максимально простой формы. Это позволит отладить производство в разумные сроки и без лишних затрат, так как каждое техническое усложнение конструкции увеличивает срок изготовления и повышает возможность возникновения ошибок. Для таких конструкций QWR достигаемый в них ускоряющий градиент составляет 6,0 МВ/м. Основные параметры резонатора, достигнутые в результате моделирования и оптимизации электродинамических характеристик, следующие: рабочая частота 162 МГц, геометрическая скорость $\beta_G = 0,12$, максимальное ускоряющее поле $E_{acc} = 6,0$ МВ/м, коэффициент перенапряженности по электрическому полю $E_p/E_{acc} = 6,4$, коэффициент перенапряженности по магнитному полю $B_p/E_{acc} = 11,4$ мТл/(МВ/м), эффективное шунтовое сопротивление $R_{sh}/Q_0 = 488,0$ Ом, геометрический фактор $G = R_{sh}Q_0 = 37,0$ Ом, времяпролетный фактор $T = 88,0$ %.

Была исследована механическая устойчивость резонатора в зависимости от толщины стенки резонатора, что необходимо для определения рабочей толщины ниобиевого листа, из которого будет изготовлен резонатор. Показано, что минимальная толщина листа

должна составлять 2,5 мм. Для разработанной конструкции резонатора было проведено моделирование мультипакторного разряда в диапазоне напряженностей электрического поля от 0 до 9 МВ/м, показано, что на рабочем уровне напряженности поля опасность его возникновения отсутствует [11]. Оптимизированная конструкция резонаторов первой группы принята за основу для эскизного проектирования и последующего изготовления медного прототипа в ФТИ НАНБ.

В качестве устройства ввода мощности в четвертьволновый резонатор был выбран коаксиальный волновод с емкостной антенной, позволяющий использовать наиболее простую систему подстройки коэффициента связи и при этом обладающий приемлемыми геометрическими размерами. Подстройка коэффициента связи необходима, так как в новом инжекторе предполагается ускорять различные сорта ионов, что требует изменения уровня мощности питания. Подстройка осуществляется изменением глубины погружения антенны в резонатор. Смещение резонансной частоты предполагается компенсировать при помощи устройства подстройки частоты. Выбранные значения внешнего и внутреннего радиусов коаксиального волновода составили 40,00 и 17,39 мм соответственно. Было выбрано перпендикулярное оси пролета пучка расположение устройства ввода мощности, что обеспечивает отсутствие асимметрии поля и не вносит дополнительных ограничений на минимальное расстояние между резонаторами. Электродинамические, тепловые и механические расчеты подтвердили надежность и работоспособность данной конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ по новому сверхпроводящему инжектору для ускорительного комплекса NICA была оптимизирована общая схема ускорителя. Оптимизация проведена с учетом как требований о необходимости перехода от нормально проводящего участка к СП при энергии 5 МэВ/нуклон, так и технологических возможностей предприятия-изготовителя. Для первых образцов четвертьволновых резонаторов первой группы была выбрана самая простая геометрия, в которой используется цилиндрический центральный проводник, что ограничивает максимальную напряженность ускоряющего поля на оси резонатора величиной ~ 6 МВ/м. С учетом новых требований было проведено моделирование динамики пучков протонов и ионов дейтерия. Также был разработан и оптимизирован четвертьволновый коаксиальный резонатор первой группы, выполнены все необходимые электродинамические, тепловые и механические расчеты, разработаны дополнительные устройства резонатора: ввод мощности, зонд измерителя напряженности поля, устройство подстройки частоты. Разработанная конструкция резонаторов первой группы принята за основу для эскизного проектирования и последующего изготовления медного прототипа в ФТИ НАНБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G. V. et al.* NICA Project at JINR // Proc. of IPAC'2016. 2016. P. 2061–2065.
2. *Andreev V. A. et al.* Reconstruction of Light and Polarized Ion Beam Injection System of JINR Nuclotron-NICA Accelerator Complex // Probl. At. Sci. Technol., Ser.: Nucl. Phys. Invest. 2013. No. 6(88). P. 8–12.

3. *Гусарова М.А. и др.* Проектирование и создание нового инжектора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой для модернизации ЛУ-20 // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1425–1431.
4. *Алиев К.А. и др.* О возможности использования сверхпроводящих резонаторов для реконструкции протонного инжектора комплекса «Нуклотрон» // Там же. С. 1418–1424.
5. *Derwent P., Holmes S., Lebedev V.* An 800 MeV Superconducting Linac to Support Megawatt Proton Operation at FERMILAB // Proc. of LINAC'14. 2014. P. 807–810.
6. *Barth W. et al.* A Superconducting CW-LINAC for Heavy Ion Acceleration at GSI // Proc. of 23rd Intern. Baldin Seminar “ISHEPP'16”; EPJ Web Conf., 2017. V. 138. 01026.
7. *Trubnikov G. V., Kulevoy T. V., Polozov S. M. et al.* New Superconducting Linac Injector Project for Nuclotron-NICA: Current Results // Proc. of RuPAC'16. 2016. P. 626–628.
8. *Масунов Э.С., Самошин А.В.* Фокусировка пучка в линейном ионном ускорителе, состоящем из периодической последовательности независимо фазированных сверхпроводящих резонаторов // ЖТФ. 2010. Т. 80, вып. 7. С. 115–121.
9. *Масунов Э.С., Самошин А.В.* Исследование динамики пучка в линейном сверхпроводящем ускорителе тяжелых ионов // АЭ. 2010. Т. 108, вып. 2. С. 109–118.
10. *Butenko A. V. et al.* Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron-NICA // Proc. of IPAC'17. 2017. P. 3282–3285.
11. *Gusarova M. A. et al.* Low Beta Superconducting Cavity for the New Injector Linac for Nuclotron-NICA // Ibid. P. 1058–1060.