

LXXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДРО–2022:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ИСТОЧНИКОВ
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Влияние «FLAT–TOP» резонансной системы ускорителя ДЦ–280
на пучок заряженных частиц**

П. И. Виноградов,^{1,*} А. А. Протасов,^{1,†} В. А. Семин,¹
И. В. Калагин,¹ К. А. Верламов,¹ Д. С. Яковлев,¹ В. И. Миронов¹

¹Объединенный институт ядерных исследований. Россия 141980, Дубна

(Поступила в редакцию 12.09.2022; после доработки 10.10.2022; принята к публикации 13.10.2022)

Эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов (СТЭ), выполненные в Лаборатории ядерных реакций имени Г. Н. Флерова (ЛЯР), показали, что вероятность образования одного события СТЭ составляла от одного события в месяц до одного события в неделю. В настоящее время наиболее тяжелым элементом, синтезируемым в реакциях с ^{48}Ca является элемент с $Z = 118$ (Оганесон). Для синтеза новых СТЭ необходимо использовать более тяжелые бомбардирующие частицы: ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe и т.д. В экспериментах с более тяжелыми частицами поперечное сечение образования изотопов СТЭ ожидается более низким, чем в случае использования ^{48}Ca . Из этого следует, что необходимо увеличение интенсивности пучков бомбардирующих ионов для набора статистики экспериментов в разумное время. Таким образом, для синтеза сверхтяжелых элементов в ЛЯР Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) была создана Фабрика сверхтяжелых элементов. Базовой установкой Фабрики является циклотронный комплекс ДЦ–280. Данный ускоритель позволяет получать пучки ускоренных ионов высокой интенсивности. С повышением интенсивности в пучке увеличивается энергетический разброс. Для того, чтобы минимизировать этот процесс, циклотрон ДЦ–280 оснащен дополнительной ускоряющей системой «FLAT–TOP».

PACS: 29.27.Bd, 29.20.bg, УДК 53.05.

Ключевые слова: «FLAT–TOP» ускоряющая система, заряженные частицы, фабрика сверхтяжелых элементов, энергетический разброс.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.78.2310502

ВВЕДЕНИЕ

В 2019 г. был введен в эксплуатацию циклотронный комплекс ДЦ–280 (рис. 1). В основу проекта легли как новые, так и экспериментально проверенные научные и инженерные решения ЛЯР ОИЯИ. Одной из новых систем циклотрона ДЦ–280 стала «FLAT–TOP» резонансная система (рис. 2) (плоская в широком диапазоне фаз вершина) [1]. «FLAT–TOP» резонансная система необходима для уменьшения энергетического разброса пучка ускоренных ионов при работе ускорителя на высоких интенсивностях (свыше $3\text{ p}\mu\text{A}$).

Чтобы изучить и проанализировать работу «FLAT–TOP» резонансной системы, была выполнена настройка ускорителя на максимальное прохождение пучка при интенсивности $10\text{ p}\mu\text{A}$ $^{40}\text{Ar}^{8+}$ из источника ионов. Результаты работы ускорителя с включенной и настроенной системой «FLAT–TOP» сравнивались с работой ускорителя без дополнительной ускоряющей системы. В ходе

изучения влияния дополнительной ускоряющей системы на пучок ускоренных ионов отслеживался ряд его характеристик.

1. ФАБРИКА СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Фабрика сверхтяжелых элементов создана с целью расширения возможностей и повышения эффективности проведения экспериментов по синтезу и изучению ядерно-физических и химических свойств СТЭ. Базовой установкой Фабрики является циклотрон ДЦ–280, который обеспечивает получение ускоренных пучков ионов от Ne до U; отношение масс к заряду ионов (A/Z) составляет от 4 до 7.5 [2].

Циклотрон

Изохронный циклотрон ДЦ–280 предназначен для ускорения и вывода пучков заряженных ионов с повышенной интенсивностью и энергией от 4 до 8 МэВ/нуклон [3]. В среднем эффективность прохождения пучка от источника ионов до мише-

* E-mail: vinogradovpi@jinr.ru

† E-mail: protasov@jinr.ru

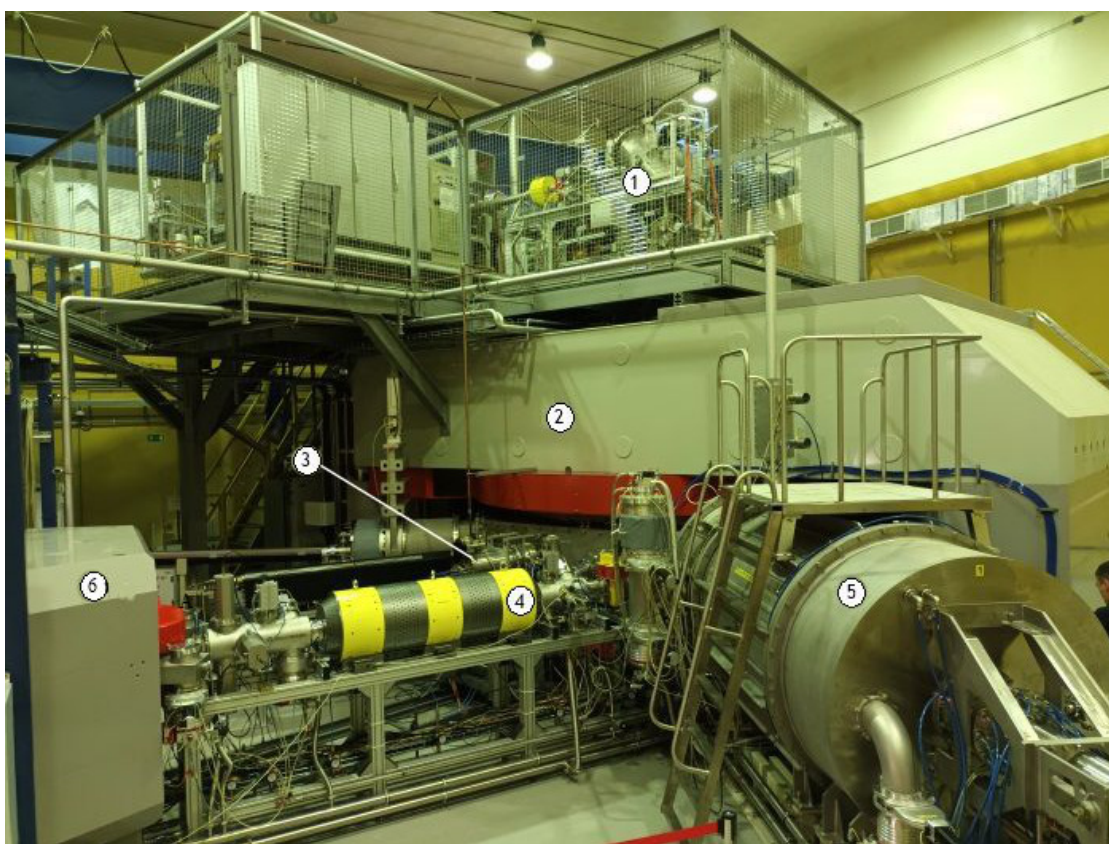


Рис. 1. Циклотрон ДЦ–280, где 1 — система аксиальной инжекции, 2 — основной магнит циклотрона, 3 — ВЧ-резонатор «FLAT–TOP» системы, 4 — транспортировочный канал пучка, 5 — ВЧ-резонатор основной ускоряющей системы. 6 — распределяющий магнит ТМ [5]

ни физической установки стремится к 50%. Полученные результаты в ходе эксплуатации циклотрона подтверждают это. Эффективность прохождения пучка является достаточно важной характеристикой ускорителя, особенно при ускорении дорогостоящих материалов.

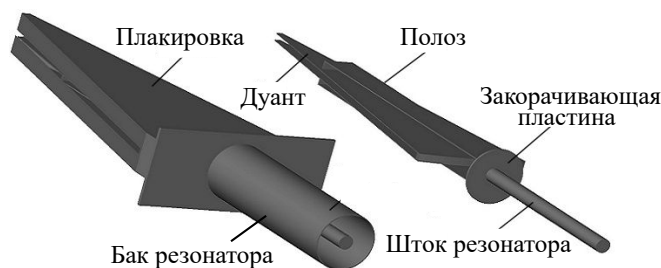


Рис. 2. 3Д модель «FLAT–TOP» резонатора ДЦ–280

Для определения характеристик пучка циклотронный комплекс ДЦ–280 оснащен достаточно широким спектром измерительных систем: цилиндры Фарадея для определения интенсивности пучков ионов; люминофоры с камерами для определения пространственного распределения (профиля) пучка, внутренние *pic-up* электроды для отслеживания изохронности ускорения, щелевые цилиндры Фарадея для определения радиального

размера пучка и т.д. [4]. Для анализа влияния «FLAT–TOP» резонансной системы на пучок ускоренных ионов использовались все измерительные системы циклотрона.

«FLAT–TOP» резонансная система представляет собой дополнительную ускоряющую систему, работающую на 3-й гармонике относительно основной ускоряющей системы [6]. Система реализована в виде двух дополнительных четвертьволновых резонаторов (рис. 2), которые расположены диаметрально противоположно друг другу. Четвертьволновый резонатор является коаксиальной линией с одной стороны нагруженной на емкость (Дуант), а с другой стороны — закороченной (закорачивающая пластина). В резонаторе образуется стоячая волна с максимумом напряжения на дуанте и максимумом тока на закорачивающей пластине. Напряжение передается на дуант с помощью полоза, который соединяет шток резонаторного бака и дуант. С помощью такой конфигурации возможно получать достаточно однородное напряжение до 13 кВ на всей протяженности дуанта дополнительной ускоряющей системы.

«FLAT–TOP» система оказывает прямое воздействие на процесс ускорения частиц. Напряжение на дуантах дополнительной резонансной системы подбирается таким образом, чтобы оно было равно 1/10 от напряжения основной ускоряющей систе-

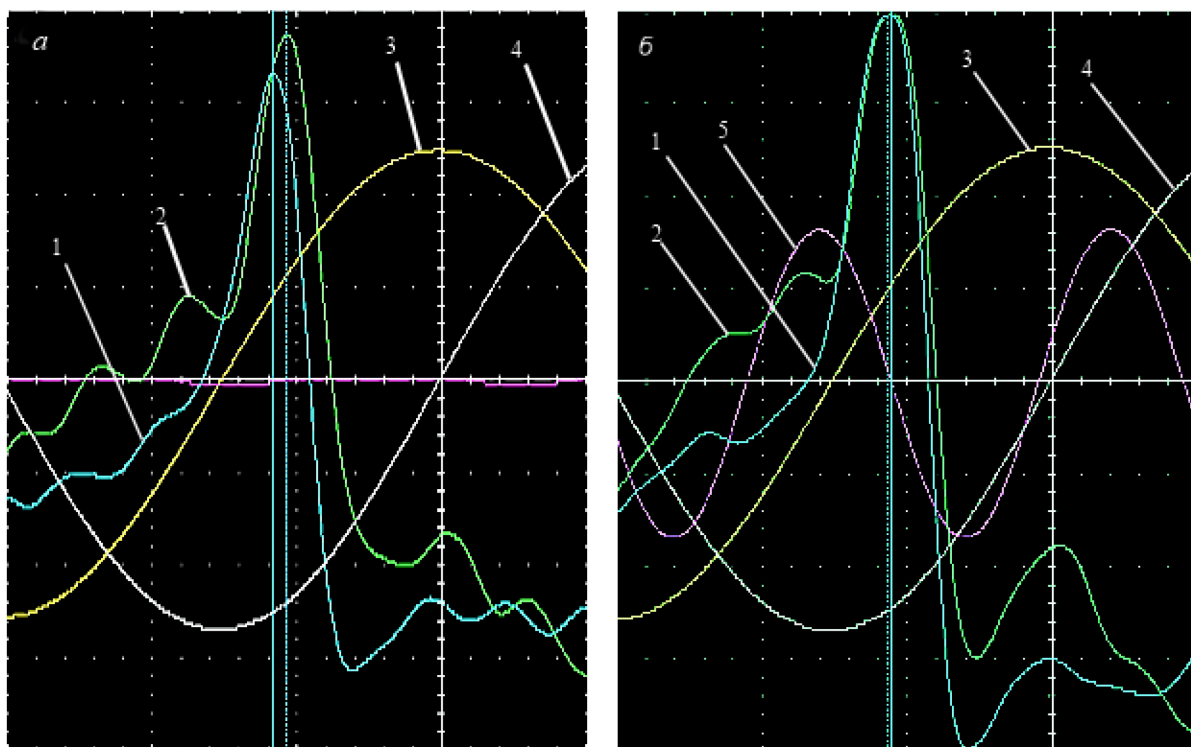


Рис. 3. Фазовый разбег ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$ с выключенной системой «FLAT-TOP» (а) и с включенной системой (б), где: 1 — сигнал с орбиты на радиусе 1024 мм, 2 — сигнал с орбиты на радиусе 1739 мм, 3 — сигнал основной ускоряющей системы по току, 4 — перекоммутированный сигнал основной ускоряющей системы по напряжению, 5 — сигнал по напряжению с «FLAT-TOP» ускоряющей системы

мы. Фаза ускорения выстраивается так, что пучок ускоренных ионов попадает в тормозное напряжение системы, которое позволяет группировать пучок, что, как следствие, приводит к уменьшению энергетического разброса пучка, а также к увеличению азимутального размера пучка [7]. Суммарное ускоряющее напряжение принимает вид синусоиды с плоской вершиной. Таким образом, частицы в пучке получают одинаковый прирост энергии за один оборот ускорения.

2. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В связи с увеличением интенсивности бомбардирующих частиц, необходимо получение пучков ускоренных ионов более высокого качества для увеличения вероятности образования СТЭ. Для того, чтобы понять, способна ли «FLAT-TOP» резонансная система снизить энергетический разброс и увеличить азимутальный размер пучка заряженных частиц, необходимо изучить влияние системы на пучок ускоренных ионов.

2.1. Влияние на изохронное ускорение пучка

Ускорительный комплекс ДЦ-280 является изохронным циклотроном. Основной составляющей, которая отвечает за изохронность ускорителя, яв-

ляется достаточно сложная структура магнитного поля [8]. С помощью системы внутренних *pic-up* электродов, которые установлены в камере циклотрона, отслеживается фазовый разбег пучков на разных орбитах ускорения. При проведении работы по изучению влияния «FLAT-TOP» резонансной системы на пучок ускоренных ионов было замечено, что дополнительная резонансная система в данном эксперименте влияет на фазовый разбег частиц (рис. 3). На разных орбитах с включенной дополнительной ускоряющей системой, фазовый разбег пучков сведен к минимуму.

2.2. Влияние на профиль выведенного пучка из циклотрона

На канале транспортировки ускорителя ДЦ-280, установлен люминофор, с помощью которого можно определять пространственное распределение пучка ускоренных ионов в канале. При анализе полученных профилей пучка, стало явным, что резонансная система «FLAT-TOP» позволяет получить более сфокусированный пучок ускоренных ионов на выходе из камеры циклотрона. После включения и настройки дополнительной ускоряющей системы горизонтальный размер пучка ускоренных ионов уменьшился с 24 мм до 16 мм, вертикальный размер остался прежним (рис. 4).

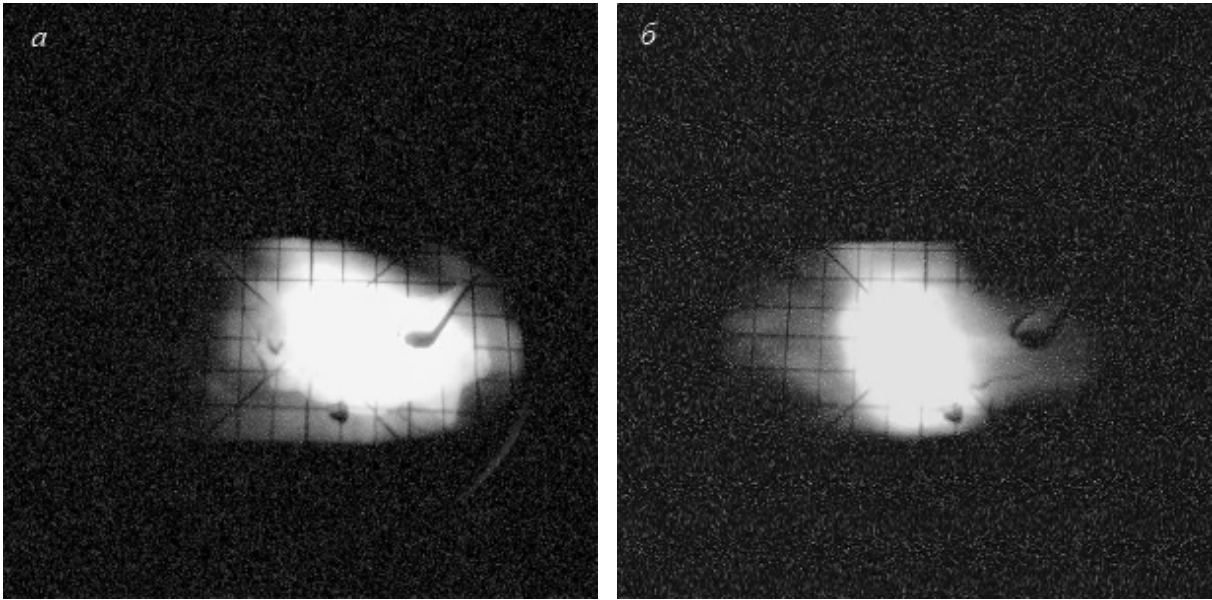


Рис. 4. Фотография пучка ионов попавших на пластину люминофора в канале транспортировки с выключенной (а) и с включенной (б) системой «FLAT-TOP»

2.3. Энергетический разброс выведенного пучка

Как упоминалось ранее, резонансная система «FLAT-TOP» позволяет минимизировать энергетический разброс пучка. В данном эксперименте с помощью щелевого цилиндра Фарадея, установленного на канале транспортировки циклотрона ДЦ-280 и поворотного магнита (ТМ), удалось измерить поперечное распределение пучка с выключенной и включенной дополнительной ускоряющей системой (рис. 5, 6).

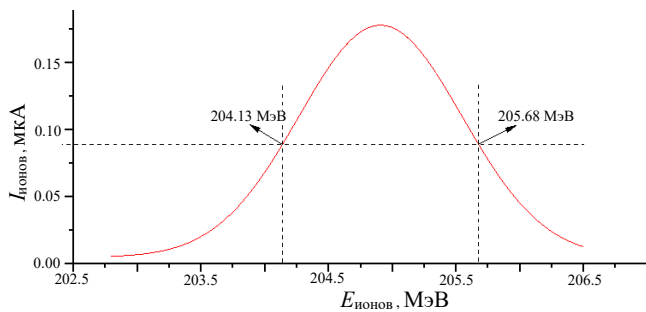


Рис. 5. Распределение плотности энергии ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$ с выключенной системой «FLAT-TOP»

Размеры пучка задавались с помощью коллиматора, установленного на канале транспортировки. По полученным данным были построены графики зависимости тока ускоренных ионов на щелевом цилиндре Фарадея от их энергии (рис. 5, 6). Далее был выполнен расчет энергетических разбросов исходя из полученных спектров. Он определялся как отношение разницы между точками, находящимися на полувысоте спектра к точке с большим значением. Формула (1) описывает расчет энергетического разброса пучка ускоренного ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$ с выключенной системой «FLAT-TOP», а формула (2) — с включенной системой «FLAT-TOP».

с включенной системой «FLAT-TOP», а формула (2) — с включенной системой «FLAT-TOP».

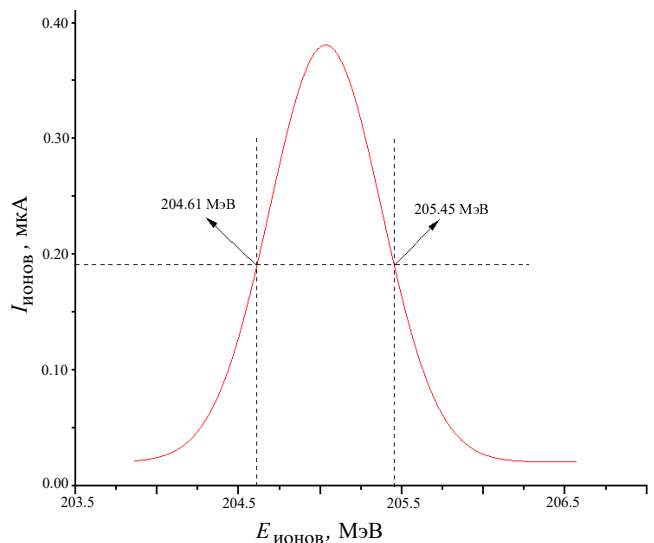


Рис. 6. Распределение плотности энергии ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$ с включенной системой «FLAT-TOP»

$$\Delta W_1 = \frac{205.68 - 204.13}{205.68} = 0.0075 = 7.5 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

$$\Delta W_2 = \frac{205.45 - 204.61}{205.45} = 0,004 = 4 \cdot 10^{-3}. \quad (2)$$

Исходя из формул (1) и (2) можно сделать вывод, что дополнительная ускоряющая система «FLAT-TOP» позволила снизить энергетический разброс ускоренного пучка почти в 2 раза.

Таблица 1. Эффективность прохождения пучка на протяжении его ускорения с выключенной системой «FLAT-TOP»

Аксиальная инжекция		Циклотрон		Система вывода
Ток пучка из ЭЦР-источника, мкА	Ток пучка в вертикальной части инжекции, мкА	Ток пучка на радиусе 400 мм	Ток пучка на радиусе 1770 мм	Ток пучка в транспортировочном канале
80.307	76.141	60.448	52.795	41.407
94.81%				
	73.35%			
		89.63%		
			78.43%	
51.56%				

Таблица 2. Эффективность прохождения пучка на протяжении его ускорения с включенной системой «FLAT-TOP»

Аксиальная инжекция		Циклотрон		Система вывода
Ток пучка из ЭЦР-источника, мкА	Ток пучка в вертикальной части инжекции, мкА	Ток пучка на радиусе 400 мм	Ток пучка на радиусе 1770 мм	Ток пучка в транспортировочном канале
80.112	76.178	59.619	53.825	43.489
95.09%				
	78.26%			
		90.28%		
			80.80%	
54.29%				

2.4. Процент трансмиссии ускоренного пучка от источника ионов до 2-го цилиндра Фарадея на канале транспортировки

Высокая эффективность прохождения пучка от источника ионов до мишени физической установки является одним из важнейших качеств ДЦ-280. В камере циклотрона показания интенсивности пучков ионов снимаются с помощью радиального токового пробника, который измеряет интенсивность пучка на разных радиусах ускорения. В аксиальной инжекции и каналах транспортировки интенсивность пучка фиксируется с помощью цилиндров Фарадея [9]. В таблицах, представленных выше, отображены показания интенсивности пучков ионов на протяжении всего этапа ускорения, от источника ионов до цилиндра Фарадея на канале транспортировки. В ходе эксперимента была улучшена эффективность захвата пучка ионов в ускорение с 77.35% до 78.26%, а также эффективность прохождения пучка через систему вывода ускорителя увеличилась с 78.43% до 80.80%. Улучшенная эффективность прохождения пучка через систему вывода говорит нам об улучшении его качества.

Стоит заметить, что процент трансмиссии пучка в камере циклотрона улучшился с 89.63% до 90.28%. Таким образом, общий процент трансмиссии пучка от источника ионов до мишени физической установки с включенной системой

«FLAT-TOP» увеличился на 2.73%.

Эффективность захвата пучка в ускорение определялась как отношение тока пучка заряженных частиц на радиусе $R = 400$ мм к току пучка ионов в вертикальной части инжекции.

Эффективность прохождения пучка через систему вывода ускорителя определялась как отношения тока на цилиндре Фарадея в канале транспортировки к току на радиусе $R = 1770$ мм.

Эффективность ускорения в циклотроне определялась как отношение тока пучка на радиусе вывода $R = 1770$ мм к току на радиусе захвата в ускорение $R = 400$ мм.

Увеличение эффективности прохождения пучка заряженных частиц через систему вывода приводит к снижению тепловой нагрузки на элементы этой системы. Для того, чтобы определить на сколько снизилась тепловая нагрузка, сначала необходимо вычислить мощность пучка на радиусе вывода. Затем вычислить мощность выведенного пучка в канале транспортировки. Разница между полученными значениями будет равна тепловой нагрузке на элементы системы вывода. Так как при выводе из циклотрона пучок заряженных частиц не получает приращения энергии, то тепловая нагрузка на систему вывода определяется формулой (3):

$$P = E(\text{МэВ}) \cdot \frac{I_{1770 \text{ мм}} - I_{\text{ToFC2}}}{Z} W, \quad (3)$$

где $I_{1770\text{ мм}}$ — интенсивность пучка на радиусе вывода (перед системой вывода), а $I_{\text{ТОРС2}}$ — ток пучка в канале транспортировки (после системы вывода).

В случае с выключенной системой «FLAT–TOP» мощность пучка будет равна 291.82 Вт, а с включенной — 264.86 Вт. При сравнении полученных мощностей видно, что включение дополнительной ускоряющей системы позволило уменьшить тепловую нагрузку на систему вывода на 9.23%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На циклотроне ДЦ–280 были проведены работы по изучению влияния «FLAT–TOP» резонансной системы на пучок ускоренных ионов $^{40}\text{Ar}^{8+}$ при интенсивности выведенного пучка порядка 5.2 μA и энергии 205 МэВ.

С помощью люминофоров, установленных на канале транспортировки, удалось определить, что

при режиме работы с включенной дополнительной ускоряющей системой горизонтальный размер пучка уменьшился на 8 мм в сравнении с режимом работы без «FLAT–TOP» резонансной системы.

Было замечено увеличение эффективности прохождения пучка заряженных частиц через систему вывода. В связи с этим, в режиме работы с включенной системой «FLAT–TOP» тепловая нагрузка на систему вывода была снижена на 9.23%.

Создание режима работы с включенной и настроенной дополнительной ускоряющей системой позволяет снизить энергетический разброс пучка ускоренных ионов в 1.875 раз. Данное улучшение позволит более эффективно проводить пучок к физической мишени через систему коллиматоров дифференциальной откачки, что повысит эффективность экспериментов по синтезу СТЭ.

В дальнейшем планируются провести работы по исследованию влияния «FLAT–TOP» резонансной системы на пучок заряженных частиц при различных режимах работы ускорителя.

- [1] Гульбекян Г.Г., Дмитриев С.Н., Иткис М.Г., Оганесян Ю.Ц. и др. Запуск циклотрона ДЦ–280 — базовой установки Фабрики сверхтяжёлых элементов ЛЯР ОИЯИ. Объединённый институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия. http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2019_6/40_Gulbehyan.pdf
- [2] Гульбекян Г.Г., Зарубин В.Б., Карамышева Г.А., Карамышев О.В. и др. Высокочастотная ускоряющая система циклотрона ДЦ–280. Объединённый институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия. http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2012_8/07_gul.pdf
- [3] Dmitriev S., Itkis M., Oganessian Yu. // EPJ Web Conf. 2016. **131**. P. 08001. <https://inspirehep.net/files>
- [4] Semin V.A., Bogomolov S.L., Gikal K., Gulbekyan G.G. et al. The experimental research of cyclotron DC-280 beam parameter. / 27th Russian Particle Acc. Conf. Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia. <https://inspirehep.net/files/7488d7a48d675ac6e46cd6a7cc057d48>
- [5] Гульбекян Г.Г., Гикал Б.Н., Бехтерев В.В., Богомолов С.Л. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2014. **11**, № 6(190). С. 1181. <https://accelconf.web.cern.ch/HIAT2015/papers/moa2c02.pdf> (Gulbekian G., Ivanenko I., Kazarinov N., E. Samsonov // JINR. Dubna, 141980, Russia).
- [6] Гульбекян Г.Г., Бузмаков В.А., Зарубин В.Б., Иваненко И.А. и др. «FLAT–TOP» система циклотрона ДЦ–280. Объединённый институт ядерных исследований. Дубна 141980, Россия. http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2013_4 (Gulbekyan G.G., Buzmakov V.A., Zarubin V.B., Ivanenko I.A. et al. FLAT–TOP System of the DC-280 Cyclotron. Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia.)
- [7] Ворожцов С.Б., Смирнов В.Л. Способ уменьшения энергетического разброса пучка в ускорителе. Объединённый институт ядерных исследований. Дубна 141980, Россия. <https://patents.google.com/patent/RU2455801C1/ru>
- [8] Комар Е.Г. Основы ускорительной физики. М.: Атомиздат, 1976.
- [9] Semin V.A., Bogomolov S.L., Gikal K., Gulbekyan G.G. et al. DC-280 Cyclotron for factory of super heavy elements, experimental results. Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia. <https://inspirehep.net/files>

Effect of the Flat-Top Resonance System of DC-280 Accelerator on a Charged Particle Beam

P.I. Vinogradov^a, A.A. Protasov^b, V.A. Semin, I.V. Kalagin, K.A. Verlamov, D.S. Yakovlev, V.I. Mironov

Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 141980 Russia

E-mail: ^avinogradovpi@jinr.ru, ^bprotasov@jinr.ru

Experiments on the synthesis of superheavy elements (SHE) performed at the Flerov Nuclear Reactions Laboratory (FLNR) have shown that the probability of a single SHE event occurrence range from one event per month to one event per week. Currently, the heaviest element synthesized in reactions with ^{48}Ca is an element with $Z = 118$ (Oganesson). To synthesize new SHEs, it is necessary to use heavier bombarding

particles such as ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{58}Fe , etc. In experiments with heavier particles, the cross-section for SHE isotope production is expected to be lower than that in the case of using ^{48}Ca . This implies that an increase in the intensity of the bombarding ion beams is necessary to collect experimental statistics within a reasonable time frame. Thus, for the synthesis of superheavy elements at the FLNR of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR), the Superheavy Element Factory was created. The basic setup of the Factory is the cyclotron complex DC-280, which allows for the production of high-intensity beams of accelerated ions. As the beam intensity increases, the energy spread also increases. To minimize this process, the DC-280 cyclotron is equipped with an additional flat-top accelerating system

PACS: 29.27.Bd, 29.20.bg.

Keywords: : flat-top accelerating system, charged particles, Superheavy Element Factory, energy spread.

Received 12 September 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. 78, No. 1. Pp. 91–96.

Сведения об авторах

1. Виноградов Павел Игоревич — ст. лаборант; e-mail: vinogradovpi@jinr.ru.
2. Протасов Андрей Александрович — начальник установки ДЦ-280; тел.: 8-963-153-03-75, e-mail: protasov@jinr.ru.
3. Семин Василий Алексеевич — начальник Научно-технологического отдела ускорителей; тел.: (496) 216-23-51, e-mail: seminva@jinr.ru.
4. Калагин Игорь Владимирович — канд. техн. наук, гл. инженер лаборатории; тел.: (496) 216-31-46, e-mail: kalagin@jinr.ru.
5. Верламов Кирилл Алексеевич — ст. инженер; тел.: (496) 216-44-40, e-mail: verlamov@jinr.ru.
6. Яковлев Денис Сергеевич — инженер; тел.: (496) 216-40-99, e-mail: yakovlevds@jinr.ru.
7. Миронов Виктор Иванович — мл. науч. сотрудник, ст. инженер; тел.: (496) 216-47-78.