

ПРОЕКТЫ РАЗВИТИЯ КОМПЛЕКСА АДРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ИФВЭ

*С. В. Иванов¹, А. И. Андриянов, А. А. Брагин,
А. П. Солдатов, Н. Е. Тюрин*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» – ИФВЭ,
Протвино, Россия

Дано краткое описание трех проектов развития действующего ускорительного комплекса У-70, предназначенных для расширения его функциональных возможностей по прикладному использованию пучков ускоренных протонов и ядер углерода. В это число входят импульсный (spallation) нейтронный источник на пучке быстрого протонного синхротрона У-1.5 и две установки для углеродной лучевой терапии — экспериментальная, на пучке синхротрона У-70, и типовая, на пучке нового специализированного ионного синхротрона.

We outline three authorized development projects for the operating U-70 accelerator complex aimed at extending its functionality for a topical applied implementation of proton and carbon-nuclei beams accelerated herewith. These comprise a pulsed spallation neutron source driven by a beam available from the U-1.5 rapid-cycled proton synchrotron, and two carbon-beam ion therapy facilities — the experimental one accepting beam from the existing U-70 machine, and the model (prototype-design) facility based on dedicated carbon-beam synchrotron to be commissioned anew.

PACS: 29.20.Lq; 29.27.Ac

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс У-70 НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ (далее — НИЦ КИ – ИФВЭ, Институт) включен в реестр уникальных научных установок, утвержденный распоряжением Правительства РФ № 2125-р от 30.12.2009. В указанном документе объект «Ускорительный комплекс У-70» определен в широком смысле как

— каскад из четырех последовательных резонансных ускорителей заряженных частиц — двух линейных, И-100 (энергия 100 МэВ, длина 79,4 м), ЛУ-30 (30 МэВ, 25,3 м), и двух кольцевых, бустер У-15 (1,32 ГэВ, длина орбиты 99,16 м), большой синхротрон У-70 (50–60 ГэВ, 1487,4 м);

— разветвленная сеть (сотни метров) каналов транспортировки и формирования выведенных пучков первичных и вторичных частиц;

— экспериментальные физические установки на каналах частиц.

¹E-mail: sergey.ivanov@ihep.ru

Большой синхротрон У-70 дал имя всему научно-техническому комплексу в целом.

По объективным причинам к настоящему времени возможности комплекса У-70 для проведения экспериментальных исследований с фиксированной мишенью по физике элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в определенной степени утратили конкурентоспособность. Стал актуален поиск иных разделов науки, техники и технологий, где востребованы ускоренные пучки адронов высокой и промежуточной энергии, доступные на У-70.

Убедительным примером успешного и востребованного продвижения в этом направлении стал новый комплекс ПРГК-100, предназначенный для импульсной многокадровой протонной радиографии быстротекающих процессов в плотных средах на пучке У-70 (энергия 50–60 ГэВ), созданный совместно с РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) [1].

Аналогичная мотивация инициировала работы по освоению комплементарных режимов ускорения и вывода углеродного ($Z/A = 1/2$) пучка в комплексе У-70, первоначально протонном ($Z/A = 1$) по проекту. С конца 1990-х гг. НИЦ КИ – ИФВЭ (Протвино) совместно с МРНЦ (Обнинск) — филиалом НМИЦ Радиологии МЗ РФ успешно осваивают методику и технику радиобиологических исследований и лучевой терапии на углеродном пучке У-70 (энергия до 455 МэВ/нуклон) [2].

В работах по этим двум прикладным направлениям подтверждены уникальные возможности быстрого синхротрона У-1.5. Его протонный пучок (энергия 1,32 ГэВ) имеет самостоятельную ценность как для экспериментов по ядерной физике и радиационной стойкости материалов и изделий (для этого был создан облучательный стенд), так и в качестве драйверного пучка для импульсной генерации нейтронов на плотной мишени.

Накопленный опыт и компетенции НИЦ КИ – ИФВЭ позволили предложить три проекта по прикладному использованию ускоренных пучков протонов и ядер углерода комплекса У-70, позже вошедших в ФНТП «Развитие синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 годы». Проекты разработаны, уже получили положительное заключение ФАУ «Главгосэкспертиза России» (март 2023 г.) и запланированы к реализации в рамках ФНТП. В их число входят:

1) импульсный нейтронный источник на основе реакции испарительно-скалывающего типа (spallation) на протонном пучке быстрого синхротрона У-1.5 (краткое название объекта ИНИ ОМЕГА);

2) экспериментальный комплекс ионной лучевой терапии на углеродном пучке синхротрона У-70 (ЛУЧ У-70);

3) специализированный синхротрон с каналами транспортировки для ускорения и вывода углеродного пучка — прототип отечественного клинического центра ионной терапии для последующего тиражирования (ЛУЧ ТИП).

Далее представлено краткое техническое описание этих проектов.

1. ИМПУЛЬСНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК (ИНИ ОМЕГА)

Истоки предложения относятся к 2010 г., когда в Институте обсуждался проект «Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков (ОМЕГА)» [3]. В его состав входил ИНИ с драйверным протонным пучком мегаваттного уровня мощности. Пучок

предполагалось получить в каскаде из линейного ускорителя (400 МэВ) и быстрого протонного синхротрона (3,5 ГэВ, 50/2 Гц). Обсуждаемый здесь проект назван «прототип ИНИ ОМЕГА», поскольку он использует ту же концепцию и геометрию установки, но с облегченными техническими параметрами — пучок киловаттного уровня мощности, действующие линейный ускоритель УРАЛ-30 (30 МэВ) и синхротрон У-1.5 (1,3 ГэВ, 50/3 Гц) соответственно.

Установку ИНИ ОМЕГА планируют разместить в комплексе зданий «Бустер» на территории технической площадки Института.

В таблице приведены параметры протонного пучка У-1.5 как драйверного пучка для ИНИ ОМЕГА после проведения запланированных мероприятий по модернизации технологических систем. В нейтронном зале № 3Н имеются пролетные базы масштаба 20 м и более. Возможно проведение исследований по методу времени пролета в широком диапазоне энергий нейтронов от тепловых ($\geq 0,01$ эВ) до промежуточных (≤ 1 кэВ). На первом этапе реализации проекта планируется создать три время-

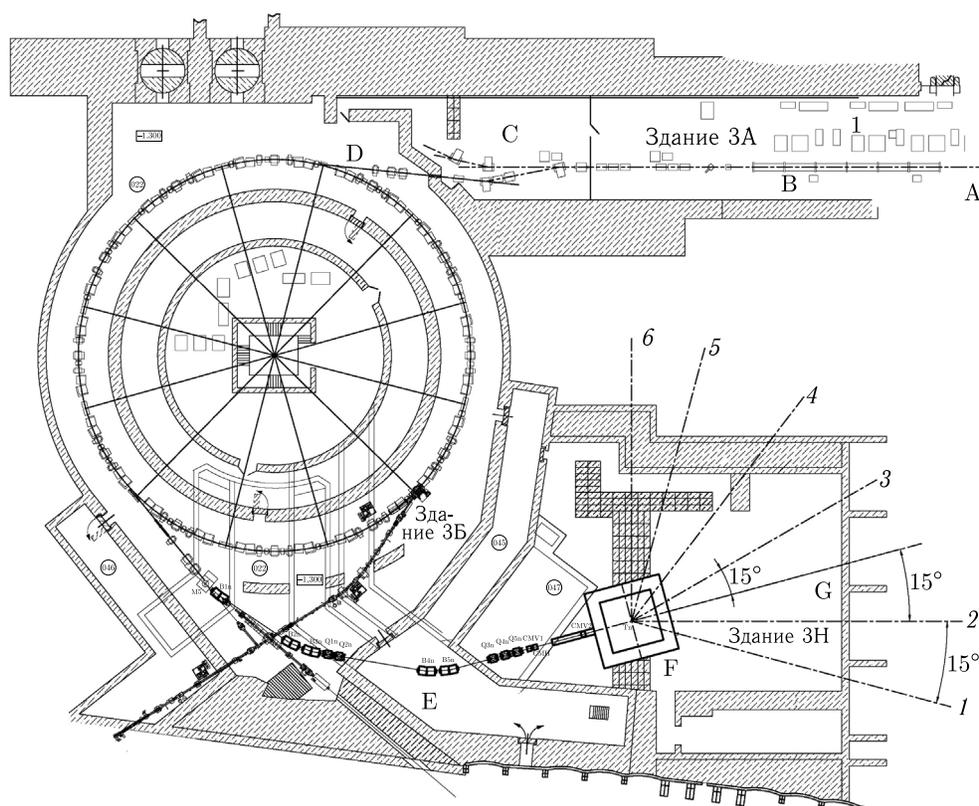


Рис. 1. Схема планировки объекта ОМЕГА. А — источник отрицательных ионов водорода H^- ; В — линейный ускоритель «Урал-30»; С — канал перевода инжектируемого пучка в кольцо У-1.5 с участком перезарядной инжекции; D — протонный синхротрон У-1.5; Е — канал транспортировки драйверного пучка к мишени; F — нейтронно-генерирующая мишенная станция; G — каналы транспортировки нейтронов и исследовательские станции

Основные характеристики драйверного протонного пучка

Параметр	Значение
Энергия ускоренных протонов, ГэВ	1,32(1,50)
Число протонов в импульсе (сгустке)	$1 \cdot 10^{12}$
Частота следования импульсов внутри пакета, Гц	$50/3 = 16_{2/3}$
Количество импульсов в пакете	29
Период следования пакетов, с	6,5
Длительность импульса (сгустка), нс	50
Мощность пучка (средняя), кВт	1,2
Выход нейтронов, нейтронов/протон	33
Интенсивность нейтронов на свинцовой (вольфрамовой) мишени полного поглощения, с^{-1}	$1,5 \cdot 10^{14}$

пролетные исследовательские станции (многодетекторный дифрактометр, нейтронный рефлектометр, нейтронную радиографическую станцию) на три из шести возможных направлений, отмеченных цифрами 1–6 на рис. 1.

В работе [4] содержатся дополнительные обосновывающие материалы по проекту.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ИОННОЙ ТЕРАПИИ (ЛУЧ У-70)

В основе проекта лежит прогресс в области физики и техники ускорения углеродного пучка, достигнутый на Ускорительном комплексе У-70 и адаптируемый к запросам экспериментальной радиобиологии и лучевой терапии. В число таких разработок входят:

1) система вывода ядер $^{12}\text{C}^{6+}$ (энергия 455–200 МэВ/нуклон) внутрь орбиты У-70 по компактной двухкаскадной схеме Пиччиони–Райта (O. Piccioni, B. T. Wright) [5];

2) система управляемой горизонтальной шумовой диффузии пучка для медленного стохастического вывода частиц [6];

3) освоение методики и техники получения прямоугольных (с малыми пульсациями плоской вершины) и длительных (0,6–1 с) импульсов тока выведенного пучка [7].

Вместе с отработкой системы получения поперечно-плоского дозового поля (неоднородность $\leq \pm 2,5\%$) перечисленные работы позволили с 2015 г. приступить к систематическим радиобиологическим и предклиническим экспериментам на канале № 25 (РБС) [2]. Эта деятельность послужила физическому обоснованию проекта ЛУЧ У-70.

Комплекс ЛУЧ У-70 планируется разместить в здании № 8 (клиническая часть) и в северо-восточном квадранте большого экспериментального зала № 1БВ (техническая часть) на территории технической площадки Института. Схема планировки показана на рис. 2. Четыре канала транспортировки и формирования пучка построены по модульно-функциональному принципу с максимальной унификацией номенклатуры магнитооптических элементов [8]. Первый по ходу пучка (прямой) канал уже работает с пучком в конфигурации № 25 (РБС), близкой к проектной. Синхротрон У-70 (его магнитные блоки № 27–37 из 120 попали на рис. 2) используется в режимах накопителя, растяжителя и замедлителя пучка на нижних уровнях ведущего магнитного поля $\leq 0,0354$ Тл. Максимальная энергия ядер углерода в 455 МэВ/нуклон достига-

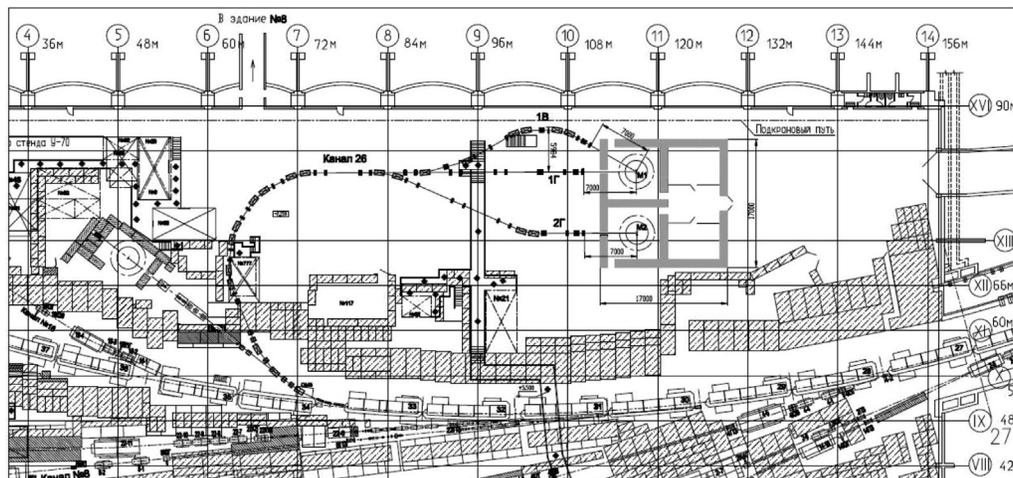


Рис. 2. Схема планировки объекта ЛУЧ У-70

ется в каскаде ускорителей И-100/У-1.5, а в кольце У-70 проводится его замедление до ≥ 200 МэВ/нуклон по требованию пользователей.

Установка ЛУЧ У-70 обеспечит интенсивность до $2 \cdot 10^9$ ядер углерода в цикле 8 или 4 с. Удельная кинетическая энергия 455–200 МэВ/нуклон. Медленный вывод пучка длится от 0,2 до 1 с. Сеть каналов транспортировки частиц завершается тремя терапевтическими кабинами с горизонтальными пучками. В одной из кабин также предусмотрен «вертикальный» пучок, направленный под углом 30° к горизонту. На рис. 2 вертикальная ветвь канала показана в проекции на горизонтальную плоскость. Угол наклона ограничен высотой нижней балки подвижного мостового крана в зале № 1БВ.

Работы над проектом ведутся совместно НИЦ КИ – ИФВЭ и МРНЦ — филиалом НМИЦ радиологии МЗ РФ.

3. ТИПОВОЙ КОМПЛЕКС ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ (ЛУЧ ТИП)

В проекте ЛУЧ У-70 углеродный пучок выводится из комплекса ускорителей, изначально предназначенного для фундаментальных исследований. По этой причине ряд задействованных технологических систем далеко не оптимален для специализированной (моноцелевой) терапевтической установки, допускающей тиражирование и автономную эксплуатацию в медицинском учреждении. Это подтверждено в ходе многолетнего опыта работы с углеродным пучком на синхротронах У-1.5, У-70 и на канале № 25 (РБС) и послужило аргументом для обоснования проекта ЛУЧ ТИП.

Установку ЛУЧ ТИП планируется разместить в здании № 371 на территории технической площадки Института. Схема планировки показана на рис. 3. Геометрия и принципы сооружения четырех каналов транспортировки и формирования пучка и терапевтических кабин во многом повторяют схему каналов ЛУЧ У-70 (ср. с рис. 2).

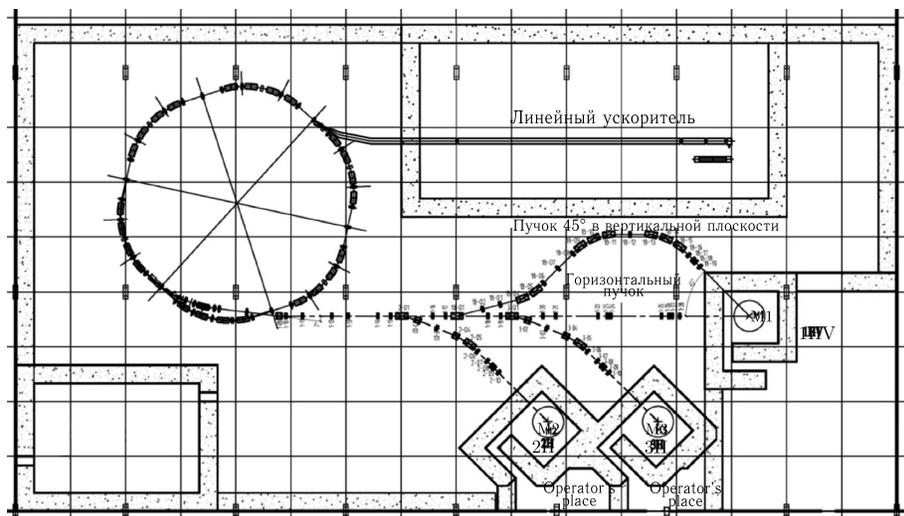


Рис. 3. Схема планировки объекта ЛУЧ ТИП

Высота зала в здании № 371 позволила разместить «вертикальный» пучок, направленный под (большим) углом наклона в 45° к горизонту.

Пучок будет ускоряться в каскаде из линейного ускорителя ионов (энергия 8 МэВ/нуклон, $^{12}\text{C}^{4+}$ (до выходной перезарядной мишени)) и сильнофокусирующего синхротрона КИТ¹ ($^{12}\text{C}^{6+}$, длина орбиты 79,92 м). Энергия выводимого пучка перестраивается в пределах от 430 до 150 МэВ/нуклон. Интенсивность $5 \cdot 10^9$ ядер в цикле 8 с. Предусмотрен медленный стохастический вывод с длительностью плоской вершины импульса от 0,2 до 4,0 с. Это допускает проведение как флэш-терапии, так и синхронизацию облучения с дыханием пациента.

Ключевой проблемой для любого медицинского ускорителя является качественный медленный (многооборотный) вывод ускоренного пучка. По этой причине в первом (предсерийном) варианте синхротрона предусмотрено размещение оборудования для двух независимых комплементарных систем медленного вывода: 1) резонансной, с помощью горизонтального нелинейного резонанса третьего порядка на квадратичной нелинейности магнитного поля, и 2) нерезонансной схемы [5] с помощью тонкой внутренней мишени-замедлителя. Оконечный каскад магнитных дефлекторов — общий для обеих систем.

Первая из них десятилетия применяется для вывода протонов из синхротрона У-70 на максимальной энергии 50–60 ГэВ. Вторая — хорошо зарекомендовала себя для вывода ядер углерода с промежуточной энергией 455–200 МэВ/нуклон из У-70. Окончательный выбор будет проведен по итогам сравнительных пусконаладочных испытаний.

Работы над проектом также ведутся совместно НИЦ КИ–ИФВЭ и МРНЦ — филиалом НМИЦ радиологии МЗ РФ.

¹Аббревиатура от названия «Курчатовский комплекс ионной лучевой терапии».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Три новых проекта развития комплекса адронных ускорителей НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ существенно расширят возможности для прикладных применений ускоренных пучков протонов и ядер углерода Ускорительного комплекса У-70. Проекты соответствуют профилю основной деятельности и компетенциям Института (ускорители заряженных частиц, экспериментальные исследования с помощью выведенных пучков и неподвижных мишеней). Изложена предыстория появления проектов, логика их обоснования, разработки и интеграции в состав действующего научно-технического комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов Ю.М., Трутнев Ю.А. и др. Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ // ПТЭ. 2010. № 3. С. 1–8.
2. Антипов Ю.М., Ульяненко С.Е. и др. Формирование поперечно-плоского дозового поля и первые радиобиологические эксперименты на углеродном пучке, выведенном из У-70 // ПТЭ. 2015. № 4. С. 107–116.
3. Новости и проблемы фундаментальной физики. Т.2(9). ИФВЭ, Протвино. 2010. 52 с. <http://exwww.ihep.su/ihep/journal/ИФЭР-2-2010.pdf>.
4. Ковальчук М.В. и др. Импульсный нейтронный источник на основе испарительно-скалывающей реакции на базе протонного синхротрона У-1.5 // Кристаллография. 2022. Т. 67, № 5. С. 795–800.
5. Антипов Ю.М. и др. Медленный вывод пучка ядер углерода из синхротрона У-70 // ПТЭ. 2021. № 3. С. 5–14.
6. Иванов С.В., Лебедев О.П. Поперечная шумовая раскачка пучка в синхротроне У-70 // ПТЭ. 2013. № 3. С. 5–11.
7. Иванов С.В., Лебедев О.П. Получение прямоугольных импульсов тока пучка при стохастическом медленном выводе из синхротрона У-70 // ПТЭ. 2015. № 4. С. 14–23.
8. Гаркуша В.И. и др. Магнитооптическая система медицинского канала ионов углерода на ускорителе У-70. Препринт ИФВЭ 2022-10. Протвино: НИЦ КИ – ИФВЭ, 2022. 12 с.

Получено 15 сентября 2023 г.