### УДК 621.039.518.4, 621.039.573; 621.384.6 DOI 10.53403/02054671\_2021\_4\_05

# ЯДЕРНЫЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ РФЯЦ-ВНИИЭФ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

## Д. В. Будников, С. В. Воронцов, С. Л. Глушков, В. С. Гордеев, В. Б. Гречушкин, А. А. Девяткин, Н. В. Завьялов, А. А. Кайгородов, С. А. Картанов, В. Ф. Колесов, С. Т. Назаренко, А. В. Панин, А. А. Пикулев, К. Г. Плузян, М. Л. Сметанин, К. В. Страбыкин, А. В. Тельнов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 27.08.2021, после доработки – 07.09.2021, принята к публикации – 18.11.2021

Представлен обзор проводимых в РФЯЦ-ВНИИЭФ работ по модернизации действующих и разработок новых ядерных и электрофизических установок – мощных источников ионизирующих излучений.

**Ключевые слова:** критический стенд, импульсный ядерный реактор, ускоритель заряженных частиц, ионизирующее излучение.

NUCLEAR AND ELECTROPHYSICAL FACILITIES OF RFNC-VNIIEF: THE PRESENT AND THE FUTURE / D. V. Budnikov, S. V. Vorontsov, S. L. Glushkov, V. S. Gordeev, V. B. Grechushkin, A. A. Devyatkin, N. V. Zavyalov, A. A. Kaygorodov, S. A. Kartanov, V. F. Kolesov, S. T. Nazarenko, A. V. Panin, A. A. Pikulev, K. G. Pluzyan, M. L. Smetanin, K. V. Strabykin, A. V. Telnov // It's presented a review of RFNC-VNIIEF activities aimed at operating facilities reconstruction and design of new nuclear and electrophysical installations as powerful ionizing radiation sources.

Key words: criticality machine, nuclear pulse reactor, charged-particle accelerator, ionizing radiation.

#### Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ постоянно проводятся исследования, направленные на совершенствование экспериментально-испытательной базы, расширение ее возможностей и решение новых задач. Начиная с первой рентгеновской установки (1947 г.), первого критического стенда (ФКБН, 1950 г.), первого статического реактора ВР-1 (1956 г.), специалисты института создали разнообразные ускорители электронов (импульсные ускорители прямого действия, линейные индукционные ускорители, резонансные ускорители), критические стенды для исследований различных размножающих систем (PC), импульсные ядерные реакторы (ИЯР) и уникальные облучательные комплексы (OK). В настоящее время в Институте ядерной и радиационной физики (ИЯРФ) РФЯЦ-ВНИИЭФ сосредоточена крупнейшая в России экспериментальная база моделирующих установок с широким диапазоном амплитудновременных и спектрально-энергетических характеристик.

Первый критмассовый эксперимент с плутониевой активной зоной (АЗ) в урановом отражателе был проведен специалистами ВНИИЭФ в Челябинске-40. Установка по инициативе Ю. С. Замятнина получила сокращенное название ФиКоБыН (физический котел на быстрых нейтронах), которое в последующем сократилось до ФКБН. В дальнейшем во ВНИИЭФ для проведения опытов с размножающими системами были разработаны специальные стенды для критических сборок (СКС): ФКБН (1950 г.), ФКБН-1 (1955 г.), МСКС (1959 г.), ФКБН-2 (1965 г.), ФКБН-2М (1976 г.), ФКБН-3 (2015 г.). Проведение критмассовых экспериментов во ВНИИЭФ имеет 70-летнюю историю. За прошедшее время были изучены параметры ~1200 различных РС, в том числе моделей АЗ создаваемых импульсных ядерных реакторов [1, 2].

На введенном в сентябре 2015 г. в эксплуатацию СКС ФКБН-3 [1] (рис. 1, 2) традиционно проводится экспериментальное изучение размножающих систем для проверки нейтронных констант и теоретических моделей, при этом обеспечивается возможность получения следующих тестовых данных:

– критических параметров PC (коэффициент умножения Q, реактивность  $\rho/\beta_{э\phi}$ , эффективный коэффициент размножения нейтронов  $K_{э\phi}$ );

– кинетических параметров PC (спады цепочек делений в PC, характеризующиеся показателем спада – показателем Росси-альфа);

 – характеристик спектра нейтронов внутри и снаружи РС (нормированное на нейтрон утечки число реакций деления и активации в индикаторах);

 – распределения числа делений по радиусу активной зоны PC;

 – числа делений в АЗ, нормированного на нейтрон утечки из РС. В настоящее время особое внимание уделяется снижению погрешностей получаемых результатов путем уточнения химического и изотопного состава материалов PC, учета нелинейности зависимости реактивности от зазора между блоками PC, учета зазоров между полусферическими деталями. Для определения реальных размеров и формы деталей из инертных материалов и создания их расчетных моделей используется координатно-измерительная машина (КИМ-1000).

Разработана расчетная модель СКС ФКБН-3 в экспериментальном зале (рис. 3), с использованием которой оценено влияние на  $K_{3\phi}$ отдельных частей стенда, зазора между блоками PC, опор для размещения блоков PC на стенде ФКБН-3, а также стен, пола и потолка экспериментального зала.

Разрабатывается аппаратурно-программный комплекс для измерения нейтроннофизических характеристик PC, с помощью которого предполагается производить измерение реактивности PC и спектров нейтронов. Планируется метрологическая аттестация методик измерения реактивности на основе методов обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК), Шестранда, стреляющего источника.

Начались работы по созданию банка данных тестовых сборок, изученных на СКС типа ФКБН. Ведется разработка требований к его структуре. Предполагается, что в банк данных будут включены тестовые сборки, изученные в обоих федеральных ядерных центрах.



Рис. 1. Экспериментальный зал СКС ФКБН-3



Рис. 2. Пульт управления СКС ФКБН-3



Рис. 3. Расчетная модель СКС ФКБН-3 в экспериментальном зале: 1 – детекторная стойка, 2 – ограждения блоков PC; 3 – система подачи источника нейтронов к PC; 4 – электромеханический стенд; 5 – механизм дистанционной загрузки; 6 – устройство дистанционной сборки и разборки PC

Установленный срок эксплуатации СКС ФКБН-3 – 20 лет (до 2035 г.), поэтому данная установка позволяет реализовать все намеченные на среднесрочную перспективу планы исследований.

Ядерные реакторы с самого начала использовались в качестве источников нейтронов для облучения различных объектов. Даже первый в мире реактор Chicago Pile-1 со смешными, по современным меркам, мощностью 200 Вт и плотностью потока нейтронов  $10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$  имел семь экспериментальных каналов, предназначенных для облучения фольг [3]. История реакторов во ВНИИЭФ началась с запуска в 1956 г. установки ВР-1 (рис. 4) – реактора бассейнового типа, работающего на статической мощности, с АЗ, набранной из отдельных стержневых твэлов [2].

Подтверждая известное правило, что все развивается по спирали, в 2016 г. во ВНИИЭФ проведены работы по превращению СКС ИКАР-С, созданного в рамках разработки реактора-лазера (РЛ) [4], в облучательную установку. Успешные эксперименты с импульсными лазерами с ядерной накачкой (ЛЯН) дали старт программе по созданию прообраза РЛ – ядерного физического комплекса (ЯФК) ИКАР-500 – ЛМ-16, включающего реактор-облучатель ИКАР-500 и 16-канальный лазерный модуль ЛМ-16. Критический стенд ИКАР-С был веден в эксплуатацию в декабре 2008 г. с целью исследования РС, моделирующих АЗ реактора ИКАР-500. Стенд представляет собой графитовую матрицу  $(2,4\times2,4\times2,4)$  м<sup>3</sup>, в которой имеются 9 сквозных каналов сечением  $(0,5\times0,5)$  м<sup>2</sup> (рис. 5). В каждый канал помещались по 2 секции (рис. 6), образующие реакторный модуль. В ЯФК, в нижнем центральном канале, предполагалось размещать



Рис. 4. Реакторный зал реактора ВР-1

лазерный модуль ЛМ-16. Для стенда в ГНЦ НИИАР (г. Димитровград) было изготовлено уран-алюминиевое топливо (алюминиевые пластины с диспергированным в них высокообогащенным ураном). Для обеспечения значимого температурного коэффициента гашения реактивности в 2013 г. был проведен физический пуск СКС ИКАР-С с центральным модулем, содержащим уран-графитовое топливо, изготовленное по отработанной в радиохимическом отделе ВНИИЭФ технологии (пропитка графитовых блоков раствором β-дикетоната уранила) [2].

Но в 2016 г. работы по программе создания РЛ были прекращены. Однако имеющийся СКС ИКАР-С вполне мог использоваться для облучения крупногабаритных объектов, размещаемых в канале, изначально предназначенном для ЛМ-16. Такое предложение было озвучено на конференции «Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования» еще в 2015 г. [5]. И после проведения физического пуска и ввода в эксплуатацию 30.12.2016 СКС ИКАР-С успешно используется для проведения испытаний крупногабаритных объектов на стойкость к статическому нейтронному и гамма-излучению (рис. 7). Отличительной особенностью СКС ИКАР-С являются значительные размеры облучательной полости, (200×50×50) см<sup>3</sup>, поскольку для размещения объектов используется, как и предлагалось, нижний центральный канал в графитовой матрице. Совместно с ФГУП «ВНИИФТРИ» на стенде аттестован эталонный нейтронный источник – комплекс моделирующих опорных нейтронных полей (МОП-КЗ) [6].

В использовании СКС ИКАР-С по новому назначению есть одно неудобство: по действующим правилам полный запас реактивности, собранной на стенде РС, включая облучаемый объект, не должен превышать  $0,5\beta_{э\phi}$ , в то же время реактивность должна быть больше нуля для вывода РС на мощность. Таким образом, нужно, чтобы реактивность сложной, имеющей значительные размеры системы находилась в узком интервале  $0 < \rho < 0,5\beta_{э\phi}$ , что достаточно трудно обеспе-



Рис. 5. СКС ИКАР-С со стороны устройства загрузки секций



Рис. 6. Реакторная секция с U-Al топливом



Рис. 7. Облучаемый объект перед загрузкой в СКС ИКАР-С

чить при облучении крупногабаритных объектов. Поэтому приходится изменять зафиксированную при физическом пуске базовую конфигурацию РС, т. е. производить ее переборку с изменением состава реакторных секций. А это длительный, сложный процесс (вес секции ~500 кг), приводящий к большой дозовой нагрузке на персонал. В то же время, поскольку СКС ИКАР-С должен был моделировать АЗ реактора ИКАР-500, он имеет значительное количество органов регулирования реактивности (ОРР), исполнительные механизмы (ИМ) которых расположены над РС: 12 стержней регулирования реактивности (СРР) и 16 стержней аварийного сброса (САС), - используемых в качестве органов аварийной защиты (рис. 8). Суммарный «вес» СРР составляет ~ 24<sub>βэф</sub>, суммарный «вес» САС ~  $40\beta_{ab}$ , что позволяет, при необходимости, с лихвой компенсировать реактивность, вносимую облучаемым объектом, и обеспечивать быстрый перевод РС в глубоко подкритическое состояние.

Учитывая вышеизложенное, а также то, что назначенный срок эксплуатации СКС ИКАР-С – 5 лет, т. е. до 30.12.2021, в настоящее время проводятся работы по созданию на базе СКС ИКАР-С статического реактора ИКАР-М.

Эксплуатация ИЯР во ВНИИЭФ была начата в 1965 г. с запуском растворного реактора ВИР-1 и реактора с металлической АЗ – БИР-1. Обе установки постоянно совершен-



Рис. 8. Схема ОРР СКС ИКАР-С

ствовались. Кроме них во ВНИИЭФ были созданы реакторы БИГР, ТИБР, РИР, БР-1, БР-К1, ГИР. Основные характеристики установок приведены в табл. 1 [2]. Помимо генерирования импульсов все ИЯР могут работать в статическом режиме, а также в режиме генерирования импульсов на запаздывающих нейтронах (квазиимпульсов).

В настоящее время во ВНИИЭФ эксплуатируются 4 импульсных ядерных реактора: с металлической активной зоной (БР-1М и ГИР2-КР), растворной активной зоной (ВИР-2М), керамическим топливом (БИГР). Кроме того проводятся работы по физическому пуску модернизированного ИЯР с металлической АЗ – БР-К1.

**БИГР** (быстрый импульсный графитовый реактор) является самым мощным в мире импульсным реактором на быстрых нейтронах [2]. Материал АЗ – однородная спрессованная смесь высокообогащенного (90 % по <sup>235</sup>U) диоксида урана с графитом. Отношение числа ядер углерода и урана равно 16, что позволяет подучить значительное энерговыделение за импульс и сохранить достаточно жесткий спектр нейтронов. Масса топлива в АЗ – 833 кг. Реактор введен в эксплуатацию в 1977 г. и на 01.06.2021 выдал 1227 импульсов и квазиимпульсов, а также 843 статических пуска.

Активная зона (рис. 9) имеет форму полого цилиндра и состоит из отдельных слоев, которые складываются из кольцевых элементов. Каждое кольцо имеет уступы на середине высоты по всей окружности, с помощью которых оно опирается на соседнее кольцо или на внешний чехол. Между кольцами предусмотрены зазоры для радиальных и осевых смещений при увеличении температуры АЗ. Такая конструкция, впервые реализованная на реакторе БИГР, является оптимальной для дисперсионного топливного материала. АЗ разбита на 3 блока: неподвижный блок (НБ), блок грубой регулировки (БГР) и блок тонкой регулировки реактивности (БТР). В качестве импульсного стержня используется стальная труба, работающая при генерировании импульса в качестве «внутреннего» отражателя АЗ. Активная зона целиком заключена в герметичный кожух, заполненный гелием.

Таблица 1

Vanaumanuamuua	Реактор							
ларактеристика	ВИР-2М	БИР-2М	ТИБР	БИГР	БР-1М	РИР	ГИР2-КР	БР-К1
Ввод в эксплуатацию 1 <sup>й</sup> модификации; последней	1965 2013	1965 1991	1970	1977	1978 2009	1981 1984	1984 2019	1995 2023
Состояние на 01.06.2021	Действует	Оста- новлен (2005)	Передан в НИИП	Действует	Действует	2 опыта	Временно остановлен	Физпуск
Материал АЗ	$UO_2SO_4+$ + H <sub>2</sub> O	U+Мо сплав	U+Mo, ZrH <sub>1</sub> o	UO <sub>2</sub> +С керамика	U+Мо сплав	U	U+Мо сплав	U+Мо
Масса топлива, кг	7,1 (104 л)	121	124	833	176	~25	178	1511
Размеры АЗ, см	Ø68×200 (корпус)	Ø22×22	Ø27,5	Ø76×67	Ø27×27	~Ø24	Ø30	Ø62×75
Полость для облу- чения, мм	Ø142 Ø300	Ø40	Ø28	Ø100	Ø100	_	_	Ø308×360
Энерговыделение, МДж	62	3	7	280	9,6	450	7	91
Удельное энерговы- деление, Дж/г	600	25	56	340	55	18000	40	60
Полуширина импульса, мкс	2680	60	480	2000	67	~2,5	300	600
Температура АЗ, °С	250	300	700	900	570	взрыв	400	640

Характеристики импульсных реакторов, разработанных во ВНИИЭФ



Рис. 9. Схема АЗ реактора БИГР: 1 – ИС; 2 – НБ; 3 – корпус АЗ; 4 – контейнер ЦК; 5 – топливные кольца; 6 – БГР; 7 – БТР; 8 – кожух охлаждения; 9 – осевая полость

Облучение возможно в центральном канале (ЦК) в контейнере (диаметр – 10 см, высота – 550 см) и снаружи АЗ в зале размером (11,5×10×8) м (рис. 10). Ввиду высокого уровня остаточного гамма-излучения вход в зал запрещен, поэтому облучаемые объекты доставляются к АЗ (с противоположных сторон) дистанционно на двух специальных тележках. Максимальное энерговыделение в импульсе  $E_{\text{max}} = 280 \text{ MДж};$  полуширина импульса  $T_{1/2} =$ = 2 мс. Система управления и защиты (СУЗ) установки обеспечивает возможность генерации в автоматизированном режиме импульсов на запаздывающих нейтронах (ИЗН) различной формы, в том числе и прямоугольной. Мощность при этом может меняться от 0,5 до 500 МВт, длительность – от 0,5 до 100 с,  $E_{\rm max} = 300$  МДж. Реактор может работать также на статической мощности до 0,5 МВт.

Поскольку БИГР был введен в опытную эксплуатацию в 1977 г., многие системы реактора морально устарели и требуют замены. Поэтому в рамках федеральной целевой программы (ФЦП) в 2023–2026 гг. планируется проведение модернизации реактора в части замены СУЗ и исполнительных механизмов (ИМ) ОРР, а также проведение техперевооружения реакторных помещений в части замены инженерных систем.

БР-1М (бустер-реактор) – импульсный реактор с металлической АЗ [2]. Введен в эксплуатацию в 2009 г. Установленный ресурс работы топливных элементов (ТЭ) АЗ - не более 3000 импульсов на мгновенных нейтронах (с энерговыделением не более 2,7·10<sup>17</sup> делений). На 01.06.2021 произведено 315 импульсов. Материал АЗ – сплав высокообогащенного (90 % по<sup>235</sup>U) урана с молибденом (массовая доля – 10 %). Масса топлива – 176 кг. АЗ имеет форму полого цилиндра (рис. 11) и состоит из 4 блоков: верхнего (ВБ), нижнего (НБ), регулирующего (РБ) и импульсного (ИБ). ТЭ в блоках заключены в чехлы из нержавеющей стали. заполненные гелием. Для снижения механических напряжений, обусловленных тепловым ударом, АЗ БР-1М, по аналогии с АЗ БИГР, разбита на ряды коаксиальных свободно подвешенных, незакрепленных колец, каждое из которых своим уступом, выполненным на половине высоты, опирается на соседнее кольцо или на наружный чехол.

Расчетными исследованиями показано и при проведении физического пуска экспериментально подтверждено, что до энерговыделения  $E = 3,0\cdot 10^{17}$  делений деформирование ТЭ происходит практически упруго, а при больших энерговыделениях – упругопласти-



Рис. 10. Реактор БИГР

чески. В настоящее время БР-1М входит в состав облучательного комплекса (ОК) «Пульсар» [7] и может работать как совместно с ускорителем ЛИУ-30 и другими установками комплекса, так и в автономном режиме в каземате (рис. 12) размером (14×10×8) м. Объект может находиться в любом месте зала или в контейнере ЦК с размерами: Ø9,4 см, высота – 30 см.

Ресурс ТЭ позволяет эксплуатировать реактор еще не один десяток лет и использовать его для проведения разнообразных исследований и испытаний. Ведутся работы по оснащению реактора БР-1М новой СУЗ. Физический пуск модернизированного реактора намечен на 2028 г.



Рис. 11. Конструкция АЗ реактора БР-1М: 1 – ВБ; 2 – НБ; 3 – ИБ; 4 – РБ; 5 – борный фильтр; 6 – лист; 7 – кожух



Рис. 12. БР-1М в зале автономной работы

ГИР2-КР (гамма-источник реакторный – комплексный регулятор) – импульсный реактор с металлической АЗ и отражателем нейтронов, выполняющим функцию *п*-ү-конвертора. Материал АЗ – сплав обогащенного урана с молибденом (массовая доля - 9%). Общая масса топлива в АЗ – 178 кг. АЗ имеет сферическую форму (рис. 13, 14) и состоит из двух полушарий, разделенных диафрагмой из нержавеющей стали. Неподвижная верхняя часть АЗ включает семь полусферических слоев, причем внутренние слои содержат уран 90 %-ного, а внешний – 36 %-ного обогащения. Нижняя часть АЗ состоит из двух подвижных блоков: БГР и БТР. БГР включает шесть слоев с ураном 90 %-ного, БТР – 1 слой с ураном 36 %-ного обогащения. Для генерирования импульса использовался импульсный блок в виде алюминиевой трубы. Отличительной особенностью реакторов типа ГИР является использование в конструкции отражателя нейтронов из гомогенной смеси полипропилена с окисью кадмия толщиной 60 мм, что повышает выход гамма-излучения и снижает возмущения от внешних устройств. В отражателе имеется отверстие («нейтронное окно»), предназначенное для облучений с максимальным нейтронным флюенсом.



Рис. 13. Схема АЗ реактора ГИР-2: 1 – конвертор; 2 – источник нейтронов; 3 – ИБ; 4 – ВБ; 5 – диафрагма; 6 – БГР, 7 – БТР

Реактор ГИР-1 был введен в эксплуатацию в 1984 г. и вошел в состав первого облучательного комплекса ЛИУ-10 – ГИР. Реактор ГИР-2 введен в эксплуатацию в 1993 г. и стал составной частью модернизированного ОК «ЛИУ-10М – ГИР2» (рис. 15) [7].

В 2014 г. эксплуатация установки приостановлена. Поскольку параметры ГИР-2 уже не удовлетворяли возросшим требованиям по радиационной стойкости изделий, а ОК «ЛИУ-10М – ГИР2» по функциональным возможностям существенно уступал ОК «Пульсар», было принято решение перепрофилировать установку. После модернизации и проведенного в 2015 г. физического пуска реактор ГИР2-КР (рис. 16) стал использоваться для изучения возможностей систем управления ядерных установок в переходных режимах, которые моделируются при генерировании квазиимпульса. По результатам физического пуска, проведенного в 2019 г., определено, что период разгона при генерировании квазиимпульсов не должен быть короче 0,4 с. А поскольку активная зона у реактора ГИР2-КР осталась прежней, то при случайном выходе выше мгновенной критичности переход не сможет превысить установленную для ГИР-2 величину, и аварийная ситуация для ГИР2-КР будет представлять собой штатный импульс ГИР-2 с энерговыделением 7 МДж. В 2021 г. срок эксплуатации установки ГИР2-КР продлен на 19 лет, до 12.04.2040.



Рис. 14. ГИР-2 в исходном положении



Рис. 15. Реактор ГИР-2 у выводного окна ускорителя ЛИУ-10М



Рис. 16. Реактор ГИР2-КР

ВИР-2М (водный импульсный реактор) – импульсный реактор с растворной АЗ, в котором в качестве топлива используется раствор соли (уранилсульфата) высокообогащенного (90 % по <sup>235</sup>U) урана в воде (объем топливного раствора – 104,6 л, концентрация урана в растворе – 67,9 г/л, масса урана – 7,1 кг). Топливный раствор залит в корпус АЗ реактора, размещенный в перекрытии между двумя находящимися друг над другом реакторными залами (рис. 17, 18), так что нижний торец корпуса находится на уровне потолка нижнего зала. Со всех сторон, кроме нижнего торца, реактор окружен блоком биологической защиты (ББЗ) с минимальной толщиной по бетону 1,5 м. Прочный герметичный корпус (рис. 19) изготовлен из нержавеющей стали Х18Н9Т и имеет форму цилиндра (высота – 2 м, диаметр – 0,68 м, толщина стенок – 65 мм). В днище корпуса выполнен полусферический



Рис. 17. Нижний зал ВИР-2М



Рис. 18. Верхний зал ВИР-2М (крышка ББЗ)

канал (ПСК) внутренним диаметром 300 мм. К крышке корпуса приварен центральный канал (ЦК) с внутренним диаметром 142 мм и шесть каналов для стержней управления реактивностью (СУР) из гидрида лития, расположенных равномерно по окружности диаметром 360 мм и служащих для управления (регулирующие стержня реактором. Два стержни РС-1 и РС-2 с электромагнитами аварийного сброса) перемещаются только электромеханическими приводами, а две пары стержней (импульсные стержни ИС) – как электромеханическим, так и пневмоприводом.

Модернизация реакторов серии ВИР была связана с усовершенствованием конструкции корпуса АЗ. Реактор ВИР-2М эксплуатируется с 1979 г. С 1996 по 2001 гг. ВИР-2М был остановлен для плановой замены корпуса. В 2011–2013 гг. проведены работы по оснащению реактора новой СУЗ. Реактор вновь введен в эксплуатацию в конце 2013 г.



Рис. 19. Корпус АЗ реактора ВИР-2М: 1 – корпус АЗ; 2 – СУР; 3 – ЦК; 4 – ПСК

на срок 7 лет, с ограничением числа импульсов на мгновенных нейтронах (ИМН) – не более 750. В 2020 г. срок эксплуатации ИЯР ВИР-2М был продлен на 6 лет, до 22 ноября 2026 года, с ограничением числа ИМН в установленный срок – не более 500. На 01.06.2021 (начиная с 2013 г.) на реакторе произведено 212 импульсных и 210 статических пусков.

Создание в РФЯЦ-ВНИИТФ нового растворного реактора ИГРИК-2 [8] инициировало начало работ по модернизации ИЯР ВИР-2М. Предполагается разработать для реактора новый корпус АЗ, а также оснастить реактор системой каталитической рекомбинации радиолитического газа и новой двухконтурной системой охлаждения АЗ, что позволит проводить длительные непрерывные статические пуски. Число СУР предполагается увеличить до 8, все их оснастив новыми универсальными приводами.

Новый корпус АЗ (рис. 20) планируется изготовить также из нержавеющей стали, увеличив его диаметр и, соответственно, внутренний объем. В корпусе будет выполнен сквозной центральный канал с отличающимися по размерам верхней (ВЦК) и нижней (НЦК) частями. Для фиксации 8 каналов для СУР (СК) предполагается использовать 4 дистанционирующие решетки (перемычки), обеспечивающие также снижение давления на крышку корпуса при разлете топливного раствора.



Рис. 20. Корпус АЗ модернизированного реактора ВИР-2М (ВИР-3)

Сравнение характеристик действующего (ВИР-2М) и модернизированного (ВИР-3) реакторов приведено в табл. 2. Предполагаемый срок ввода в эксплуатацию модернизированного реактора ВИР-2М (ВИР-3) – 2027 г.

Сравнение параметров ИЯР ВИР-3 и ВИР-2М

Таблица 2

Параметр	ВИР-3	ВИР-2М
Размеры корпуса АЗ (диаметр × высота), мм	880×2000	680×2000
Размеры облучатель- ных каналов, мм	Ø 200 (ВЦК) Ø 400×500 (НЦК)	Ø 142 (ЦК) Ø 300 (ПСК)
Рабочий объем ТР, л	164	104,8
Концентрация урана в ТР, г/л	56	67±1
Масса урана в ТР, кг	9,2	7,1
Количество стержней регулирования	8	6
Максимальное энерго- выделение в импульсе, МДж	130	60
Длительность импульса на полувысоте, мс	2,8	2,7
Мощность в статиче- ском режиме, кВт	20	12

**БР-К1** (бустер-реактор «Каскад», вариант 1) – импульсный реактор с металлической АЗ и со сложной историей. Как и у реактора

БР-1М, в его названии присутствует слово «бустер», т. е. устройство, которое действует в подкритическом по мгновенным нейтронам состоянии в качестве размножителя нейтронов периодического или непериодического внешнего источника. Оба реактора изначально предназначались для работы в бустерном режиме совместно с мощным импульсным линейным ускорителем электронов ЛИУ-30 [9], поэтому и были названы бустер-реакторами. Предполагалось, что ЛИУ-30 с использованием специальной мишени обеспечит импульс фотонейтронов с общим числом 10<sup>15</sup>, размножение которых в АЗ бустеров позволило бы генерировать мощные короткие импульсы нейтронного и гамма-излучения.

Бустер-реактор «Каскад» (БР-К) [10] проектировался для каскадного умножения импульса фотонейтронов последовательно в двух A3: внутренней, изготовленной из металлического нептуния-237, и внешней – из урана-235 36 %-ного обогащения (рис. 21). Массив вольфрама исключал влияние внешней активной зоны (A3-2) на внутреннюю (A3-1).

Однако ЛИУ-30 смог обеспечить выход фотонейтронов только на уровне 10<sup>14</sup> за импульс, что не позволяло достичь проектных параметров бустеров. Эксперименты по генерированию импульсов при работе БР-1 в бустерном режиме совместно с ЛИУ-30 были проведены, но результаты (табл. 3) [9] показали бесперспективность работ в данном направлении, поскольку энерговыделение БР-1 в режиме ИМН более чем на порядок превышало полученные значения.

Таблица 3

Коэффициент умножения на мгновенных нейтронах	Энерговыделение, делений	Полуширина импульса, мкс
500	$0,25 \cdot 10^{16}$	5
1000	$0,5 \cdot 10^{16}$	10
2570	$1,4{\cdot}10^{16}$	25

Параметры импульсов при работе БР-1 в бустерном режиме



Рис. 21. Схема АЗ реактора БР-К: 1 – отражатель; 2 – РБ-2 (АЗ-2); 3 – ПБ-2; 4 – АБ; 5 – НБ-2; 6 – РБ-1 (АЗ-1); 7 – СБ-2 и ИБ-2; 8 – канал для ТИ; 9 – замедлитель (<sup>6</sup>LiH); 10 – ПБ-1; 11 – ИБ-1; 12 – НБ-1; 13 – массив вольфрама; 14 – контейнер для образцов (РБ, ПБ, АБ, НБ, ИБ – регулирующий, подвижный, аварийный, неподвижный и импульсный блоки, соответственно)

«Слабые» импульсы в бустерном режиме БР-1, а также большие трудности в изготовлении деталей из металлического нептуния привели к тому, что реактор БР-К был введен в эксплуатацию в 1995 г. с одной, внешней, активной зоной в режиме классического импульсного реактора и получил название БР-К1. Материал АЗ – сплав обогащенного (36% по <sup>235</sup>U) урана с молибденом (массовая доля – 9 %). Общая масса уран-молибденового сплава – 1511 кг. АЗ имеет форму полого цилиндра (рис. 22) и разбита на диски (блоки), а диски – на коаксиальные кольца. Блоки АЗ заключены в герметичные чехлы из нержавеющей стали, заполненные гелием. Для генерирования импульса использовались импульсный и стоп-блок, изготовленные из бериллия. Отличительными особенностями реактора БР-К1 являются горизонтальная ориентация АЗ, что обеспечивает удобство загрузки образцов в центральную полость, значительный размер полости для облучения, а также значительные размеры самих топливных блоков (рис. 23) [2].

Проектом предусматривалось максимальное энерговыделение в АЗ БР-К1 ~100 МДж. Однако при проведении физического пуска было обнаружено затирание АБ из-за коробления чехлов структурных блоков, обусловленного их большими размерами и высокой температурой разогрева. В результате макси-

мальное энерговыделение в импульсе было ограничено значением  $E_{\text{max}} = 30 \text{ MДж}$ . Генерация такого импульса предполагает переход через верхнее критическое состояние  $\sim (2-3) \cdot 10^{-2} \beta_{ab}$ , обеспечение которого требует ювелирного мастерства от персонала. Поэтому в импульсном режиме реактор практически не работал. Эксплуатация его велась лишь в режиме генерирования ИЗН, а также на статической мощности. На базе реактора были созданы комплекс моделирующих опорных полей нейтронов МОП-К и пространственно совмещенный с ним эталонный источник реакторных гамма-квантов, и БР-К1 использовался, в основном, как «метрологическая» установка.

В период с 2016 по 2019 гг. была проведена модернизация реактора (названного затем БР-К1М) с целью реализации импульсного режима с близким к проектному энерговыделением [11]. Для того, чтобы исключить коробление чехлов топливных блоков при интенсивном разогреве, они были изготовлены из титанового сплава ВТ-20, который обладает лучшими механическими характеристиками, чем нержавеющая сталь. Активная зона окружена графитовым отражателем (рис. 24) для «затягивания» импульса с целью снижения термомеханических напряжений в ТЭ до допустимых значений.



Рис. 22. Схема АЗ реактора БР-К1: КГЗ – контейнер горизонтальной загрузки; РБ – регулирующий блок; ПБ – подвижный блок; НБ-2 – второй неподвижный блок; АБ – аварийный блок; НБ-1Л – 1-й неподвижный блок правый; ИБ, СБ – импульсный блок и стоп-блок



Рис. 23. Реактор БР-К1

Для генерирования импульсов в безопасном режиме «с мощности» в АЗ используется новый ОРР – быстрый импульсный блок (БИБ) с исполнительным пневматическим и электромеханическим механизмом. Рабочий орган (РО) БИБ представляет собой полиэтиленовый сплошной цилиндр диаметром 98 мм, высотой 98 мм, облицованный слоем из листового кадмия толщиной 1 мм и зачехлованный в стальной кожух. Геометрический центр РО в положении «стартовое» (минимума реактивности) совмещен с геометрическим центром структурного блока АЗ НБ-1Л. БИБ после «разгона» реактора до требуемого уровня мощности пневматически «выстреливается» из АЗ, вводя заданную стартовую реактивность.

В модернизированном реакторе используется система охлаждения АЗ, размещаемая на стенде загрузки и служащая для поддержания безопасной температуры топливных блоков в статическом режиме при длительной работе.

Проведена модернизация СУЗ, в которую



Рис. 24. Реактор БР-К1М

включены новые функциональные подсистемы для управления БИБ и системой охлаждения. Вновь изготовлены подсистемы контроля мощности и отображения физических характеристик. Модернизированные и вновь разработанные составные части СУЗ воспроизводят логику работы, функции, прием, обработку и генерацию сигналов, которые обеспечивала прежняя СУЗ БР-К1.

В 2020 г. проведен первый этап физического пуска в разборных чехлах структурных блоков: определены ядерно-физические и критмассовые параметры и окончательно подобрана конфигурация АЗ. В 2021 г. после заварки ТЭ в герметичные чехлы планируется проведение второго этапа физического пуска по отработке статического и квазиимпульсного режимов. В 2022 г. запланирован завершающий этап физического пуска с генерированием импульсов на мгновенных нейтронах. Планируемый срок ввода в эксплуатацию модернизированного реактора БР-К1М – 2023 г. Проектные параметры реактора приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры импульса	Предельно допустимые параметры	Пределы безопасной эксплуатации	
Минимальная полуширина импульса, мкс	600	550	
Энерговыделение, МДж	91	106	

Проектные параметры модернизированного реактора БР-КІМ

Для проведения исследований в области радиационной физики во ВНИИЭФ создается многомодульная мультитераваттная установка «Гамма» (рис. 25) [12-17]. Первым шагом на пути к ее созданию был ввод в 2007 г. в эксплуатацию установки «Гамма-1» [18], явившейся прообразом типового модуля установки «Гамма». Установка «Гамма-1» (рис. 26) представляла собой импульсный сильноточный ускоритель электронов прямого действия со следующими параметрами: зарядное напряжение формирующей системы – 1 МВ, ускоряющее напряжение – 2 МВ, ток электронного пучка – до 1 МА, выходная электрическая мощность – 1,5 ТВт, длительность импульса тормозного излучения на полувысоте – 45 нс. На установке «Гамма-1» была отработана система передачи энергии (2011 г.), состоящая из цилиндрической и изогнутой на угол 80° водяных передающих линий и вакуумной магнитоизолированной передающей линии (МИПЛ), что позволило обеспечить сведение в заданную область импульсов тока отдельных модулей многомодульной установки (рис. 25, 27).

Для размещения установки «Гамма» построили специализированное здание, в котором были проведены монтаж, отработка режимов и ввод в эксплуатацию установки «Гамма-4» – первой очереди шестнадцатимодульной установки «Гамма». Установка «Гамма-4» (рис. 27) состоит из четырех типовых модулей (одним из которых является установка «Гамма-1») и при ускоряющем напряжении 2 МВ и токе электронного пучка 3 МА является на сегодняшний день самым мощным импульсным источником тока в России [14]. Установка «Гамма-4» введена в эксплуатацию в декабре 2020 г. в трех режимах [16]: генерации импульсов тормозного излучения (ТИ); генерации импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ); ударно-волнового сжатия конструкционных материалов.

Для генерации импульсов ТИ установка «Гамма-4» может работать в двух режимах, отличающихся характером воздействия. В первом из них модули установки полностью автономны и нагрузкой каждого из них является отдельный сильноточный вакуумный диод. Диоды расположены вплотную друг к другу, образуя матрицу из четырех независимых излучателей (рис. 28). В данном случае поле излучения, формируемое установкой, является суперпозицией полей излучения ее отдельных модулей. Данный режим предназначен для облучения объектов сравнительно большой площади. Во втором режиме модули установки подключаются электрически параллельно



Рис. 26. Установка «Гамма-1» – типовой модуль установки «Гамма»



Рис. 25. Проект 16-модульной установки «Гамма»



Рис. 27. Установка «Гамма-4»

к единой диодной нагрузке (рис. 29) с целью повышения плотности энергии излучения. Данный режим предназначен для облучения объектов сравнительно малой площади, но с большей дозой ТИ.

Физической основой генерации МРИ в нагрузочном узле является процесс имплозии многопроволочного лайнера с образованием динамического Z-пинча на оси лайнерной системы под действием мультимегаамперного импульса тока. На установке «Гамма-4» лайнер стыкуется к единой диодной нагрузке и состоит из прямого (катод) и обратного (анод) токопроводов, между которыми натягиваются проволочки, равномерно расположенные на цилиндрической образующей. В обратном токопроводе напротив проволочек выполнены диагностические окна для вывода МРИ лайнерную импульса В камеру (рис. 30, 31). При отработке режима генерации МРИ в лайнере использовались 60 вольфрамовых проволочек толщиной 4 мкм и были получены энергетические параметры импульса лишь на 10 % меньше расчетных значений: мощность в максимуме – 12 ТВт, энергия в импульсе – 0,1 МДж [14].

Для расчетно-теоретического обоснования проведения экспериментов по ударно-волновому сжатию конструкционных материалов в качестве нагрузки была выбрана плоская линия, электроды которой с одной стороны соединены с внутренним электродом (катодом) и внешним электродом (анодом) единой диодной нагрузки, а с другой стороны соединены металлической проставкой. При прохождении короткого импульса тока мегаамперного диапазона по электродам плоской линии на электроды действует сила Ампера, приводящая к возникновению сверхвысоких давлений в материалах электродов. Экспериментальные исследования проводились с двумя типами электродов: из меди марки М1 и из алюминиевого сплава марки Д16 (рис. 32, 33). Параметры нагружения рассчитывались по скорости свободной поверхности электрода, измеряемой основанной на методе PDV аттестованной методикой. В режиме ударно-волнового сжатия в образце достигнуто давление 22 ГПа [16].



Рис. 28. Вакуумная камера с четырьмя автономными диодами



Рис. 29. Матрица детекторов ИКС у единой диодной нагрузки



Рис. 30. Лайнер



Рис. 31. Лайнерная нагрузка

На установке «Гамма-4» предполагается цикл исследований по экспериментальному обоснованию расчетных параметров 16-модульной установки «Гамма». В 2021 г. на установке предполагается отработать еще один режим – квазиизоэнтропическое сжатие конструкционных материалов.

В настоящее время во ВНИИЭФ ведется разработка резонансного электронного ускорителя БЕТА-8 с высокой средней мощностью пучка [12, 17, 19-21]. Его основной элемент ускоряющий коаксиальный полуволновой резонатор с рабочей частотой 100 МГц, обеспечивающий прирост энергии электронов на 1,5 МэВ за один проход. Ускоритель предназначен для работы в импульсно-периодическом и непрерывном режимах генерации пучка. Создание такого ускорителя позволит получать пучки ускоренных электронов с энергиями 1,5, 4,5 и 7,5 МэВ (после соответствующего числа проходов через резонатор) в одном общем выводном устройстве при средней мощности пучка до 300 кВт, обеспечиваемой трехмодульным ВЧ-генератором разработки Института ядерной физики им. Г. И. Будкера (г. Новосибирск).

Создан полномасштабный макет ускорителя (рис. 34), включающий в себя ускоряющий коаксиальный резонатор, ВЧ-инжектор, модуль ВЧ-генератора, рассчитанный на 180 кВт выходной средней мощности, тракт ВЧ-транспортировки, узел ввода ВЧ-мощности (УВМ), технологические системы, автоматизированную систему управления, а также элементы системы магнитной транспортировки и вывода электронного пучка.

При пониженном ВЧ-питании (от одного модуля ВЧ-генератора) в 2015 г. был осуществлен однопроходный режим проводки пучка и получена средняя энергия электронов ~1,5 МэВ [18]. Затем были получены параметры пучка после двух (2017 г.) и трех (2018 г.) проходов. В 2020 г. были реализованы 4- и 5-проходные режимы ускорения и после 5-го прохода получена средняя энергия электронов ~7,5 МэВ (рис. 35) при среднем токе электронного пучка ~40 мкА.



Рис. 32. Нагрузка для экспериментов по ударно-волновому сжатию



Рис. 33. Разрушенный медный электрод



Рис. 34. Макет ускорителя БЕТА-8: 1 – ускоряющий резонатор; 2 – УВМ; 3 – вакуумная система; 4 – канал инжекции; 5 – инжектор; 6 – фидер





Рис. 35. Энергетический спектр электронов после 5 проходов

Таким образом, на макете ускорителя БЕТА-8 на пониженной ВЧ-мощности отработаны режимы ускорения (рис. 36). Основной преградой для реализации проектных параметров ускорителя в режиме с мощностью пучка до 300 кВт (при мощности ВЧ-питания до 540 кВт) является отсутствие специализированного здания, так как соответствующий проект ФЦП не был реализован. Предполагается осуществить ввод в эксплуатацию ускорителя в имеющихся помещениях на пониженной мощности пучка ~10 кВт.

Еще одним направлением развития ускорительной техники во ВНИИЭФ является моделирование воздействия ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП), являющегося доминирующим дестабилизирующим фактором, ограничивающим функциональные возможности и срок активного существования отечественных космических аппаратов (КА), входящей в их состав радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и используемой электронной компонентной базы (ЭКБ) [22, 23].

В околоземном КП, где функционирует подавляющее большинство КА, основными компонентами космического ИИ являются частицы радиационных поясов Земли (РПЗ),

солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ). Частицы РПЗ – захваченные геомагнитным полем электроны, протоны и более тяжелые ионы – являются основным фактором, оказывающим радиационное воздействие на КА внутри магнитосферы Земли (области локализации геомагнитного поля). Характерные значения энергии частиц РПЗ лежат в диапазоне  $\sim 10^5 - 10^8$  эВ, а плотность их потоков составляет  $10^8 - 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$ . Вне магнитосферы главными факторами радиационного воздействия на КА являются ГКЛ и СКЛ. ГКЛ – это изотропный поток протонов и более тяжелых ядер, приходящий из удаленных областей нашей Галактики или из-за ее пределов. Энергия частиц ГКЛ заключена в диапазоне  $\sim 10^8 - 10^{20}$  эВ, но плотность их потока мала,  $\sim 10^1 - 10^4 \text{ м}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$ . Под СКЛ принято понимать потоки заряженных частиц (в основном, протонов) с энергией ~ $10^6 - 10^{10}$  эВ и плотностью потока  $10^7 - 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{c}^{-1}$ , которые испускаются Солнцем во время интенсивных вспышек.

Воздействие ИИ КП может приводить как к постепенному ухудшению свойств материа-



Рис. 36. Пятипроходная схема магнитной проводки пучка макета БЕТА-8: Д11-Д41 – дипольный магнит; С – соленоид; КВ – квадрупольная линза; К11–К51 – магнитный корректор; П11–П51 – поглотитель пучка (цилиндр Фарадея)

лов и характеристик бортовых систем (дозовые эффекты) и, в следствие чего – к отказам в работе КА по истечению некоторого периода эксплуатации (например, постепенное снижение эффективности солнечных батарей КА в результате накопления поглощенной дозы), так и к возникновению внезапных отказов в работе бортовой аппаратуры (одиночные события), непосредственно сопровождающих воздействие (например, сбои в микросхемах с высокой степенью интеграции под действием одиночных протонов или тяжелых ионов высокой энергии).

В США и в Европе функционируют десятки центров по испытанию ЭКБ, РЭА и КА целиком на воздействие ИИ КП. Признанными лидерами являются Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) и Brookhaven National Laboratory (BNL) в США, University Catholigue de Louvain (UCL) в Бельгии.

Подобный испытательный центр предполагается создать во ВНИИЭФ. Разработан технический проект комплекса для исследования воздействия ионизирующих излучений космического пространства [17], основой которого является синхротронный ускоритель, обеспечивающий ускорение протонов и различных типов ионов вплоть до <sup>209</sup>Ві. Ускоритель включает два инжекторных комплекса (один из которых является источником протонов и легких ионов, второй – тяжелых ионов), бустерный ускоритель и основной синхротрон, параметры которых приведены в табл. 5. Облучение объектов предполагается проводить как на основном синхротроне, так и на бустере.

Для реализации проекта создана научнопроизводственная кооперация, включающая, помимо РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИЯФ им. Г. И. Буд-РАН (г. Новосибирск), НИЯУ кера СО «МИФИ» (г. Москва), НИЦ «Курчатовский – ИТЭФ им. А. И. Алиханова институт» (г. Москва), АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» (г. Санкт-Петербург), ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» (г. Санкт-Петербург), ОИЯИ (г. Дубна). Для размещения синхротронного испытательного комплекса (СКИ) строится специальное здание (рис. 37). Начало проведения испытаний с использованием бустера планируется в 2025 г.

Таблица 5

Параметр	Буст	гер	Основной синхротрон		
Тип ускоряемых частиц	$\mathbf{p}^+$	$^{209}{ m Bi}^{41+}$	$\mathbf{p}^+$	$^{209}\mathrm{Bi}^{41+}$	
Энергия инжекции, МэВ/нуклон	7,5	4	700	36	
Энергия при выпуске, МэВ/нуклон	от 7,5 до 700	от 4 до 36	от 700 до 4000	от 36 до 400	
Интенсивность, частиц/импульс	от 104 до 1011	от 10 <sup>3</sup> до 10 <sup>8</sup>	от 104 до 1011	от 10 <sup>3</sup> до 10 <sup>8</sup>	
Периметр кольца, м	87	7	168		

## Параметры бустерного ускорителя и основного синхротрона



Рис. 37. Схема размещения синхротронного комплекса в специализированном здании

Уже упомянутый выше мощный линейный импульсный ускоритель электронов на радиальных линиях ЛИУ-30 [7, 9] является базовой установкой ОК «Пульсар» [7]. Этот ускоритель, введенный в эксплуатацию в 1988 г., позволяет получать рекордную для установок своего класса энергию ускоренных электронов до 40 МэВ при токе пучка ~100 кА в импульсе длительностью ~20 нс и является одним из наиболее мощных в мире источников коротких импульсов ТИ [7].

Ускоритель ЛИУ-30 эксплуатируется более 30 лет в «жестких» режимах, обеспечивающих его рекордные выходные характеристики. Постоянная работа персонала по модернизации и техническому усовершенствованию узлов и систем ускорителя позволяет поддерживать его в рабочем состоянии и обеспечивать проектные характеристики. Но, видимо, пришло время задуматься о достойной замене работающей на износ уникальной установке. Тем более, что на создание ускорителя ЛИУ-30 с момента обоснования разработки (1971 г.) до ввода в эксплуатацию (1988 г.) ушло почти 20 лет.

Поэтому во ВНИИЭФ ведется разработка высоковольтного импульсного ускорителя электронов, который по своим параметрам превзойдет ускоритель ЛИУ-30. Данный ускоритель, получивший название «Омега» (рис. 38), будет выполнен по схеме индукционного сумматора напряжения с вакуумной МИПЛ и включит 20 ускорительных секций, состоящих из четырех импульсных генераторов и одного индуктора. Секции, конструкция которых разрабатывается с учетом опыта создания типового модуля установки «Гамма», располагаются последовательно друг за другом вдоль оси, совпадающей с осями индукторов, с шагом, равным осевой длине индукторов. Предполагаемые размеры ускорителя «Омега»: длина ~33 м; ширина ~11 м; высота ~5,4 м.

Секция (рис. 39), являющаяся составной частью ускоряющей системы ускорителя, предназначена для накопления электрической энергии и формирования импульса ускоряющего напряжения. Каждый из четырех импульсных генераторов включает генератор импульсных напряжений (ГИН), выполненный по схеме Аркадьева-Маркса, с выходным напряжением 700 кВ, двойную ступенчатую формирующую линию (ДСФЛ) с водяной изоляцией и высоковольтные коаксиальные вводы ГИН-ДСФЛ и ДСФЛ-индуктор. Габаритные размеры секции: длина (вдоль оси индуктора) ~1,5 м, ширина ~11 м, высота ~5,4 м.

Основной функцией индуктора является суммирование (по току) импульсов высокого напряжения от четырех импульсных генераторов и передача результирующего импульса в коаксиальную МИПЛ, для которой внутренняя цилиндрическая поверхность индуктора является внешним электродом. Необходимая для надежной работы МИПЛ азимутальная



Рис. 38. Ускоритель электронов «Омега»: 1 – ускорительная секция, 2 – МИПЛ и диод



Рис. 39. Секция ускорителя «Омега»: 1 – ГИН, 2 – индуктор, 3 – ДСФЛ

симметрия импульса, подводимого по радиальной линии к зазору на внутренней поверхности индуктора, достигается тем, что электромагнитная энергия поступает в индуктор по четырем коаксиальным высоковольтным вводам, расположенным симметрично по азимуту на внешнем цилиндрическом корпусе индуктора (рис. 39).

Типовая секция будет обеспечивать следующие параметры электромагнитного импульса на выходе индуктора на согласованной нагрузке: амплитуда напряжения ~1,7 MB; амплитуда тока ~1 MA; пиковая мощность ~1,8 ТВт; длительность импульса мощности на половине высоты ~30 нс; энергия, передаваемая в нагрузку, ~54 кДж.

В результате ускоритель «Омега» с выходным напряжением ~30 MB и током ~1 MA будет формировать однократные импульсы ТИ с мощностью дозы  $10^{14}$  P/c, а также обеспечивать генерацию  $10^{15}$  фотонейтронов за импульс (за счет реакции ( $\gamma$ , n) на специальной мишени). Технический проект ускорителя будет разработан в 2027 г.

Наличие источника фотонейтронов с выходом  $10^{15}$  позволяет вернуться к идее генерации мощных коротких нейтронных импульсов на реакторе-бустере, запланированной, но, к сожалению, так и не реализованной на комплексе ЛИУ-30 – БР-1/БР-К (рис. 40) [8]. Поэтому параллельно с разработкой ускорителя «Омега» началось проектирование бустерреактора БР-3 (рис. 41). Предполагается, что при совместной работе с ускорителем в бустерном режиме работы БР-3 в полости диаметром ~400 мм будет получен флюенс нейтронов до  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> при полуширине импульса от 5 до 70 мкс. Технический проект на реактор будет завершен также в 2027 г.

Таким образом, во ВНИИЭФ продолжаются работы по модернизации действующих и разработке новых ядерно-физических и электрофизических установок. Накопленный многолетний опыт позволяет браться за решение новых сложных задач. Слаженная работа конструкторов, расчетчиков и экспериментаторов позволяет сохранять лидирующие позиции в области создания и использования мощных источников ионизирующих излучений.



Рис. 40. Реактор БР-1 у выводного окна ускорителя ЛИУ-30



Рис. 41. Схема реактора-бустера БР-3: 1 – органы регулирования, 2 – полость для облучения, 3 – активная зона, 4 – мишень

#### Список литературы

1. Панин А. В. и др. История развития критмассовых экспериментов в РФЯЦ-ВНИИЭФ // Труды межотраслевой конференции «Импульсные ядерные реакторы: история создания и перспективы использования». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016, т. 1. С. 196–210.

2. Воронцов С. В. и др. История создания и развития импульсных ядерных реакторов в РФЯЦ-ВНИИЭФ // ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, 2017, вып. 4, с. 5–20.

3. Бать Г. А., Коченов А. С., Кабанов Л. П. Исследовательские ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1979. 272 с.

4. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.

5. Влох Г. В. и др. Создание на базе критического стенда ИКАР-С статического реактора с большой облучательной полостью // Труды межотраслевой конференции «Импульсные ядерные реакторы: история создания и перспективы использования». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016, т. 2. с. 348–354.

6. Влох Г. В. и др. Создание на базе критического стенда ИКАР-С облучательной установки с аттестованным нейтронным полем // ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 29–44.

7. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Савченко В. А. и др. Моделирующие и облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии: В 2-х выпусках. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2011. Вып. 1. С. 165–191.

8. Манаков А. А., Андреев С. А., Шугаев С. В. и др. Результаты физического пуска исследовательской ядерной установки ИГРИК-2 в стационарном режиме // ВАНТ, сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 62–68.

9. Павловский А. И. и др. Мощный линейный импульсный ускоритель пучка электронов на радиальных линиях ЛИУ-30 // Приборы и техника эксперимента. 1998, № 2, с. 13–25.

10. Колесов В. Ф. Апериодические импульсные реакторы: в двух томах. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2007.

11. Девяткин А. А. и др. Пути модернизации БР-К1 для работы в импульсном режиме // Труды межотраслевой конференции «Импульсные ядерные реакторы: история создания и перспективы использования». – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016, т. 2. с. 54–64.

12. Завьялов Н. В. и др. Состояние и перспективы развития ускорителей заряженных частиц в РФЯЦ-ВНИИЭФ // «XXVI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2018». – Протвино: ИФВЭ.

13. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2012. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2013. С. 23–25. 14. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2017. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2018. С. 19.

15. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2019. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2020. С. 24–25.

16. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2020. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2021. С. 24–25.

17. 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.

18. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2011. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2012. С. 21.

19. Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ 2017. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2018. С. 20.

20. Гладышев Е. Н., Гордеев В. С., Завьялов Н. В. и др. Состояние работ по проекту создания электронного резонансного ускорителя непрерывного действия БЕТА-8 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2015. Вып. 20. Ч. 1. С. 184–193.

21. Завьялов Н. В., Кузнецов В. В., Курапов Н. Н. и др. Экспериментальная отработка проводки электронного пучка ВЧ-инжектора для резонансного ускорителя БЕТА-8 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2018. Вып. 23. Ч. 1. С. 320–327.

22. Анашин В., Алексеев И., Бодин В. и др. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов. – М.: Физматлит, 2013, 358 с.

23. Новиков Л. С. Радиационное воздействие на материалы космических аппаратов. Учебное пособие. – М.: Университетская книга. 2010, 192 с.

Контактная информация –

Воронцов Сергей Владимирович, первый заместитель директора ИЯРФ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, e-mail: vorontsov@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2021, вып. 4, с. 5–25.