

УДК 53.082.79

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РЕАКТОР ПИК

© 2021 г. М. В. Ковальчук¹, С. Л. Смольский^{2,*}, К. А. Коноплев²

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия

*E-mail: Smolskiy_SL@npi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 05.06.2020 г.

После доработки 05.06.2020 г.

Принята к публикации 12.06.2020 г.

Представлен обзор параметров и состояния дел по созданию самого мощного источника нейтронов, предназначенного для работы на выведенных пучках, исследовательского реактора ПИК (НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Гатчина). Данная установка на несколько десятилетий определит стратегию развития нейтронных исследований в РФ и станет основой Международного центра нейтронных исследований.

DOI: 10.31857/S0023476121020053

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение. История создания реактора ПИК

Характеристики реактора ПИК

Основные параметры реактора ПИК

Текущее состояние и планы

ВВЕДЕНИЕ. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ РЕАКТОРА ПИК

Реактор ПИК (пучковый исследовательский корпусной) (рис. 1) был задуман и спроектирован в начале 1970-х годов как источник нейтронных пучков самой высокой интенсивности. Сооружение комплекса было приостановлено в 1986 г. в связи с событиями на Чернобыльской АЭС. На-

чалось перепроектирование большинства систем с целью существенного повышения уровня безопасности. В отсутствие новых нормативных требований к исследовательским реакторам использовались документы для атомных станций. Основная схема реактора осталась без изменения, но значительно увеличилось число систем, важных для безопасности. Удачная схема компоновки реактора, предложенная для реактора ПИК в 1966 г. [1], в дальнейшем стала использоваться практически во всех пучковых реакторах с тяжеловодным отражателем.

В 1980 г. был пущен реактор ORPHEE во Франции, в 2007 г. – OPAL в Австралии, в 1995 г. – HANARO в Южной Корее и в 2005 г. – FRM-II в Германии. До этого для пучковых реакторов ис-



Рис. 1. Нейтронный исследовательский комплекс с реактором ПИК в Гатчине, Российская Федерация.



Рис. 2. Визит президента РФ В.В. Путина на реактор ПИК в апреле 2013 г.

пользовалась схема с тяжелой водой и для активной зоны, и для отражателя. Так были сделаны реакторы HFBR в США и HFR во Франции. Полноценно возобновить монтажные работы в 1991 г. не удалось как по причине экономического характера, так и в связи с выпуском новых требований к исследовательским реакторам. Удалось выполнить очень важную строительную часть для создания систем локализации аварии при разрыве корпуса реактора. Монтаж дополнительных узлов для увеличения безопасности различных систем реактора в полном объеме долго не начинался.

Работы возобновились только в 1999 г. после того, как руководители трех ведомств — Российской академии наук, Минатома и Миннауки России — приняли совместное решение о завершении сооружения высокопоточного пучкового исследовательского реактора ПИК, в котором стороны признали приоритетный и межведомственный характер объекта и согласились объединить свои финансовые усилия для скорейшего ввода его в строй. Тем не менее финансирование было недостаточным и осуществлялось с непредсказуемыми задержками. Строительно-монтажные работы были сосредоточены только на системах, необходимых для физического пуска реактора или обеспечивающих пусковые испытания на мощности до 100 кВт только с первым контуром охлаждения.

В 2009 г. был завершен первый пусковой комплекс в объеме, достаточном для проведения физического пуска реактора на малой мощности 100 Вт — режим критического стенда без охлажде-

ния. Физический пуск подтвердил нейтронно-физические параметры реактора, полученные в ходе расчетов, а также экспериментально на критическом стенде “Физмодель (ФМ) реактора ПИК”. Огромные усилия для продолжения строительства прилагал директор института академик В.А. Назаренко вплоть до своей кончины в 2006 г.

Ситуация начала меняться в 2010 г., когда по инициативе М.В. Ковальчука институт был включен в Программу совместной деятельности организаций, участвующих в составе НИЦ “Курчатовский институт” (НИЦ КИ). В результате в декабре 2013 г. завершилось строительство зданий реакторного комплекса ПИК — 38 зданий общей площадью 66000 м². В мае 2013 г. президент Российской Федерации В.В. Путин (рис. 2) поддержал предложение НИЦ КИ о создании приборной базы реакторного комплекса ПИК. С июля 2013 г. НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ начал разрабатывать концепцию комплекса экспериментальных установок (станций) и его инженерной инфраструктуры. Была принята стратегия ввода реактора ПИК в эксплуатацию последовательными этапами увеличения мощности реактора и числа его технологических систем, а также увеличения исследовательских установок. Такая схема позволяла решать задачи набора персонала и повышения его квалификации.

В 2018 г. проведено испытание систем реактора на мощности до 100 кВт — первого этапа Программы энергетического пуска. Для технической готовности всех трех основных контуров охлаждения, контуров аварийного охлаждения и тяжелых водных контуров необходимо закончить за-

мену части ранее смонтированных узлов, которые не соответствуют новым требованиям к оборудованию, и завершить повторное освидетельствование ранее смонтированных узлов.

Нормативные требования к оборудованию, устанавливаемому на исследовательских реакторах, требования к пожарной безопасности, требования к физической защите и другие нормативные требования изменялись весь период длительного строительства. Зачастую приходится заменять уже смонтированный прибор или узел на такой же, но имеющий действующий сертификат на объекте использования атомной энергии – исследовательском реакторе. Уроки аварии на АЭС Фукусима в Японии в 2011 г. потребовали учета при анализе безопасности всех маловероятных событий: природных явлений, внешних воздействий, технологических катаклизмов. Примерами являются оснащение смонтированных аварийных дизельно-электрических генераторов аккумуляторными батареями для надежного расхолаживания реактора и модернизация системы контроля радиационной безопасности. Новые нормативы, регулирующие обращение с отработавшим топливом и радиоактивными отходами, контроль радиоактивных выбросов требуют изменения и дополнения ряда систем.

В 2015 г. вопросы безопасности реактора ПИК начали рассматривать в НИЦ КИ, назначенном научным руководителем проекта. Для расчетов последствий различных аварийных событий в НИЦ КИ и в организации главного конструктора – АО “НИКИЭТ” – применили самые современные программы: MCU-5, MCU-PTR, PRASET, ПУЧОК-ПИК, RELAP5/MOD3.2, STEPAN/КОВРА (STEPAN-PIK и КОВРА-PIK), CHAIN, СТАРТ4, RC, STAR-CCM+ и другие, которые проходят верификацию и аттестацию в Ростехнадзоре для использования в проекте реактора ПИК.

Для верификации программ использованы экспериментальные данные, полученные на полномасштабном критическом стенде ФМ ПИК, теплофизических стендах ЦКТИ и НИЦ КИ, на высокопоточном реакторе СМ, в ходе физического пуска и начальной стадии энергетического пуска реактора ПИК. Подтверждается возможность безопасной эксплуатации реактора на запланированном этапе освоения мощности до 10 МВт и соответствующих испытаний реакторного оборудования в соответствии с программой энергетического пуска. Возникла целесообразность изменений некоторых систем реактора, часть которых необходимо осуществить до начала испытаний на мегаваттных мощностях. Часть изменений, не влияющих на безопасность, может быть отложена. К таким системам относится, например, ввод в строй установки по поддержанию концентрации трития в тяжелой воде на уровне

не более 7.4×10^{10} Бк/л (2 Ки/л), поскольку накопление трития идет достаточно медленно.

По мере завершения работ на контурах охлаждения с 2019 г. ведутся их опробование и наладка. Подрядные организации Росэнергоатома Госкорпорации “Росатом” обеспечивают весь комплекс необходимых строительно-монтажных и пусконаладочных работ. Устраняются вибрации, настраиваются контролирующие приборы. Ультразвуковым способом проверено отсутствие дефектов в корпусе реактора, которые могли возникнуть при монтаже. Проходят испытания дизельных электрогенераторов с аккумуляторами для бесперебойного электроснабжения при аварии. В 2020 г. продолжаются работы по замене приборов радиационного контроля, идет подготовка системы регулировки расхода первого контура с помощью частотных преобразователей электропитания циркуляционных насосов, тяжеловодных контуров с системами очистки к освидетельствованию, сушке и заполнению тяжелой водой. Ведутся работы по подготовке к вводу в эксплуатацию второго и третьего контуров охлаждения.

Продолжается подготовка к замене части экспериментальных каналов. Первоначальный набор установленных каналов соответствовал требованиям экспериментов 70-х годов XX века и подлежит замене. По проекту реактора каналы в тяжеловодном отражателе можно заменять, и часть каналов уже демонтирована. В рамках проекта “Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК” идет разработка экспериментальных каналов для новых установок, что позволит их смонтировать до набора элементами конструкции большой активности.

Идет подготовка к переходу от пусковой активной зоны к эксплуатационному комплексу тепловыделяющих сборок, обеспечивающих удовлетворительную длительность цикла работы реактора 25 сут между перегрузками топлива. Концепция нового топлива для реактора ПИК основана на использовании серийных тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) реактора СМ с повышенной загрузкой ^{235}U , применении выгорающего поглотителя и модернизации конструкции самой топливной кассеты. Утверждено техническое задание на разработку эксплуатационного комплекта новых тепловыделяющих сборок активной зоны, начаты работы в организациях АО “ТВЭЛ”, ГК “Росатом” и НИЦ КИ по разработке технической и технологической документации, обоснованию безопасности работы с новым топливом.

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА ПИК

Реактор ПИК представляет собой компактный нейтронный источник с объемом активной зоны ~50 л, окруженный тяжеловодным отражателем.

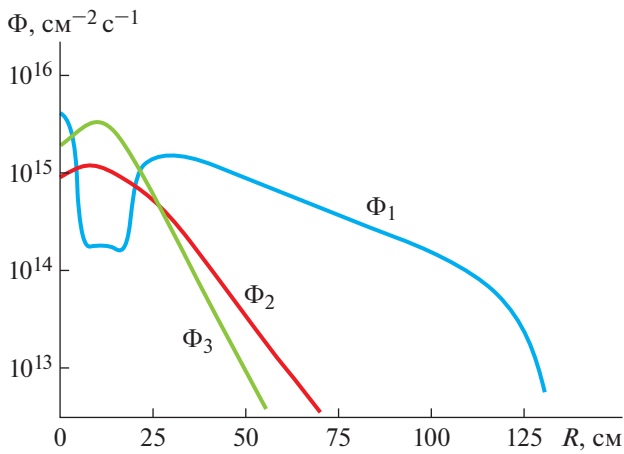


Рис. 3. Распределение нейтронных потоков: Φ_1 – поток тепловых нейтронов, $E < 0.6$ кэВ; Φ_2 – поток эпитепловых нейтронов, 0.6 кэВ $< E < 5$ кэВ; Φ_3 – поток быстрых нейтронов, $E > 5$ кэВ.

Максимальная невозмущенная плотность потока тепловых нейтронов достигает 5×10^{15} н/(см² с) в центральной водной полости и 1.2×10^{15} н/(см² с) в отражателе при тепловой мощности реактора 100 МВт (рис. 3). Активная зона (рис. 4) размещается в корпусе реактора и охлаждается легкой во-

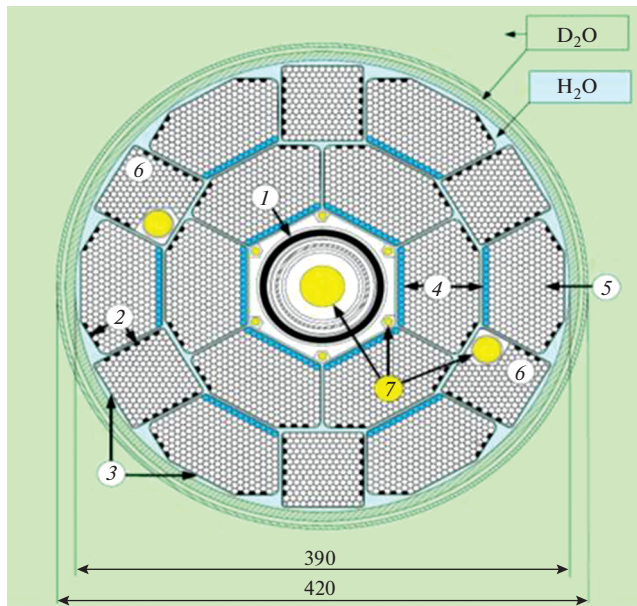


Рис. 4. Активная зона реактора ПИК (с эксплуатационным комплектом тепловыделяющих сборок (ТВС)): 1 – поглощающие шторки из гафния, 2 – стержни выгорающего поглотителя $\text{Gd}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, 3 – циркониевые чехлы ТВС, 4 – ТВЭЛ с уменьшенным содержанием топлива (0.48 номинального), 5 – ТВЭЛ с номинальным содержанием топлива, 6 – ТВС с образцами-свидетелями материала корпуса, 7 – облучаемые образцы.

дой под давлением 5 МПа. Корпус реактора, в свою очередь, помещен в бак отражателя, заполненный тяжелой водой (рис. 5).

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКТОРА ПИК

Тепловая мощность 100 МВт; усредненная по периметру ТВЭЛ плотность теплового потока достигает 10 МВт/м², что соответствует примерно 6 МВт на 1 л объема активной зоны в горячей точке; средняя по активной зоне нагрузка 2 МВт/л. В качестве топлива использованы хорошо отработанные ТВЭЛ типа СМ с увеличенной до

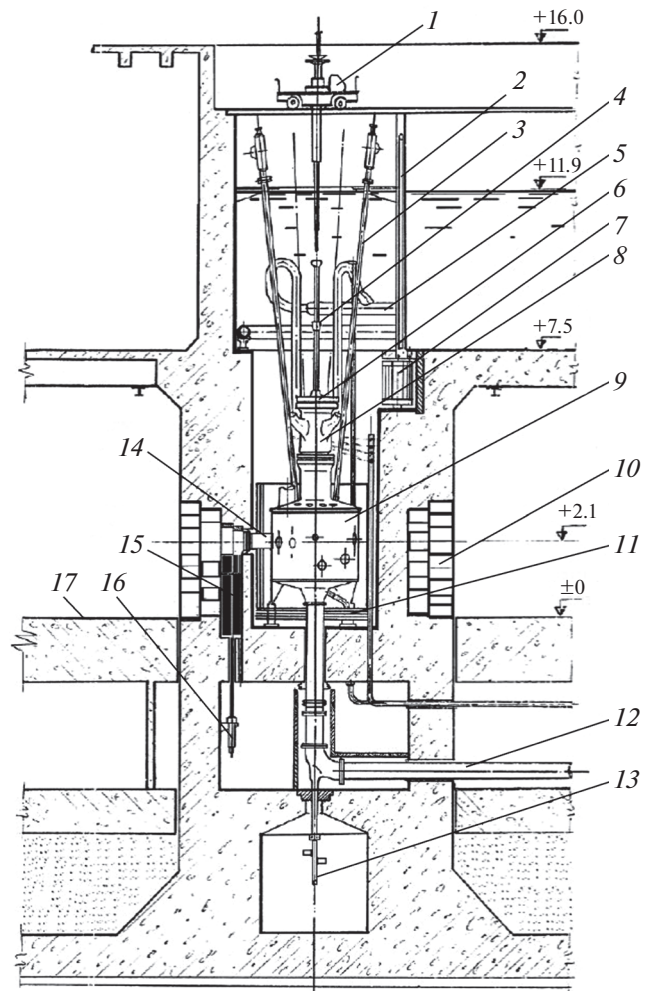


Рис. 5. Реактор ПИК в разрезе: 1 – перегрузочная машина, 2 – шандора, 3 – канал для бокового стержня управления, 4 – центральный экспериментальный канал, 5 – входной трубопровод, 6 – верхняя крышка реактора, 7 – перегрузочный барабан, 8 – верхний корпус, 9 – бак тяжеловодного отражателя, 10 – биологическая защита, 11 – железо-водяная защита, 12 – выходной трубопровод, 13 – привод центрального регулятора, 14 – горизонтальный экспериментальный канал, 15 – защитный шибера, 16 – гидропривод защитного шибера, 17 – виброзащищенный пол экспериментального зала.

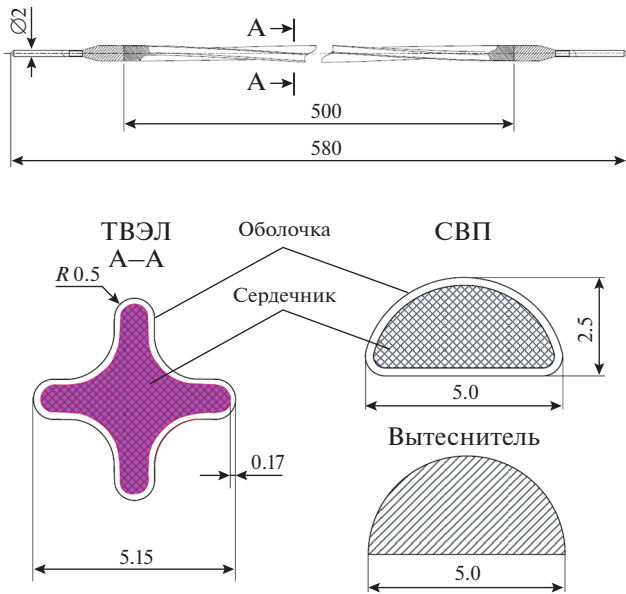


Рис. 6. Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) и стержень выгорающего поглотителя (СВП) реактора ПИК.

500 мм высотой топлива (рис. 6). Материал отражателя — тяжелая вода под давлением 0.3 МПа, диаметр отражателя 2.5 м и высота 2 м. Невозмущенная плотность потока тепловых нейтронов в отражателе $(0.1-1.2) \times 10^{15}$ н/см²·с; теплоноситель контура охлаждения — H₂O под давлением 5 МПа.

Для вывода нейтронного излучения из отражателя реактора ПИК, а также облучения образцов

реактор ПИК снабжен значительным числом экспериментальных каналов (рис. 7). Центральный экспериментальный канал (ЦЭК) размещен в водной полости активной зоны. Невозмущенная плотность потока тепловых нейтронов в полости 5×10^{15} н/см²·с; горизонтальные экспериментальные каналы (ГЭК) — девять штук; потоки тепловых нейтронов на доньшках $(0.1-1.2) \times 10^{15}$ н/(см²·с). Потоки тепловых нейтронов на выходе $(0.2-3) \times 10^{11}$ н/(см²·с); диаметры 100–250 мм; наклонные экспериментальные каналы (НЭК) — шесть штук; потоки тепловых нейтронов на доньшках $(0.2-1) \times 10^{15}$ н/(см²·с); поток быстрых нейтронов ($E > 0.7$ МэВ) на доньшке НЭК5 — 2.5×10^{13} н/(см²·с). Потоки тепловых нейтронов на выходе $(0.4-2) \times 10^{10}$ н/(см²·с); диаметры каналов 90–140 мм; вертикальные экспериментальные каналы (ВЭК) — семь штук. Потоки тепловых нейтронов на доньшках $(1-3) \times 10^{14}$ н/(см²·с); диаметры каналов 41–155 мм.

Если тепловые нейтроны ($T \sim 300$ К) образуются непосредственно в отражателе реактора, то получение нейтронов больших или меньших энергий требует использования специальных замедлителей, находящихся при определенной температуре. В реакторе ПИК предусмотрены два источника холодных нейтронов на каналах ГЭК-2 и ГЭК-3. В качестве замедлителя используется жидкий дейтерий при температуре $T = 20$ К, источник горячих нейтронов — на канале ГЭК-8. Замедлитель — графит при температуре $T = 1200-2000$ К. Транспортировка нейтронов к экспери-

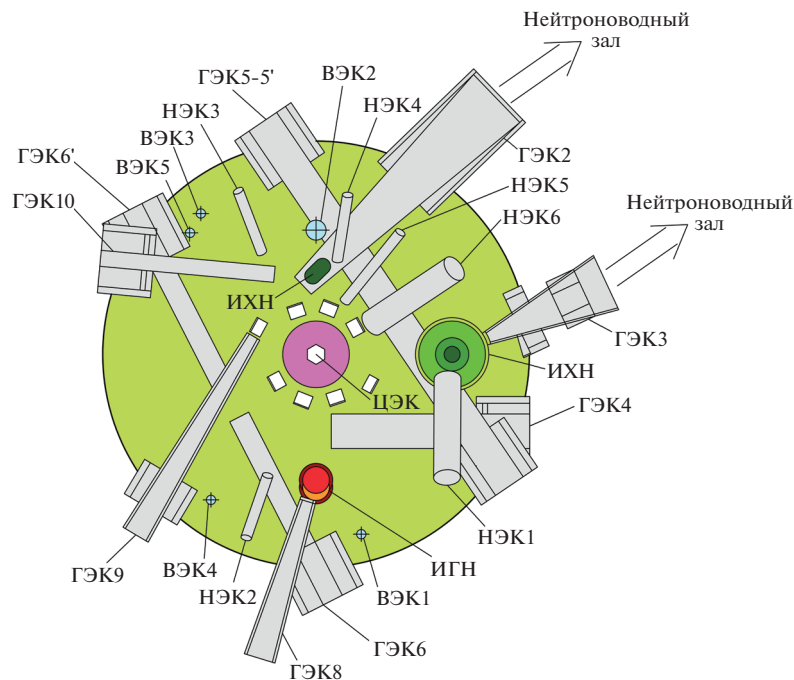


Рис. 7. Схема экспериментальных каналов реактора ПИК.

Таблица 1. Сравнительные характеристики пучковых исследовательских ядерных реакторов

Установка, местоположение	Год ввода в эксплуатацию	Тепловая мощность, МВт	Максимальная плотность потока, 10^{15} н/(см ² с)	Число пучковых позиций для инструментов
ПИК Гатчина, Россия	2022 (план)	100	5.0	до 50
HFR Гренобль, Франция	1971	58	1.5	40
HFIR Окридж, США	1965 (2007 после модернизации)	85	3.0	15
FRM-2 Мюнхен, Германия	2005	20	0.8	27
HANARO Таэджон, Ю. Корея	1995	30	0.45	7
OPAL Сидней, Австралия	2006	20	0.4	10
ИБР-2 Дубна, Россия	1984	2	0.01 (10 в импульсе)	14

ментальным станциям в нейтроновом зале осуществляется по специальным нейтроноводам в количестве 10 штук. Затем возможно ветвление для увеличения числа пучковых позиций, общая длина около 1200 м. Потоки нейтронов на выходе нейтроноводов $(0.1–1.3) \times 10^{10}$ н/(см² с).

Таким образом, по отношению к существующим исследовательским реакторам реактор ПИК предоставит уникальные возможности как для проведения более глубоких исследований с использованием нейтронов, так и для проведения новых исследований, недоступных в настоящее время на отечественных исследовательских реакторах. Несмотря на значительные сроки пуска реактора ПИК, он остается востребованным. Количество научных задач, решаемых с использованием нейтронных пучков, увеличивается с каждым годом. Совершенствуются приборы и возрастают требования к интенсивности нейтронных пучков.

По параметрам нейтронных пучков и экспериментальным возможностям реактор ПИК будет превосходить все действующие исследовательские реакторы (табл. 1), в том числе по ряду параметров реактор HFR в Европейском центре нейтронных исследований институте им. Лауэ–Ланжевена (Гренобль, Франция). По назначению и параметрам реактор ПИК логично сравнивать именно с реактором в институте Лауэ–Ланжевена в Гренобле, который характеризуется близкими величинами нейтронных потоков в горизонтальных пучках и является ведущим мировым центром нейтронных исследований.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЛАНЫ

В настоящее время в соответствии с Федеральной научно-технической программой развития синхротронных и нейтронных исследований и

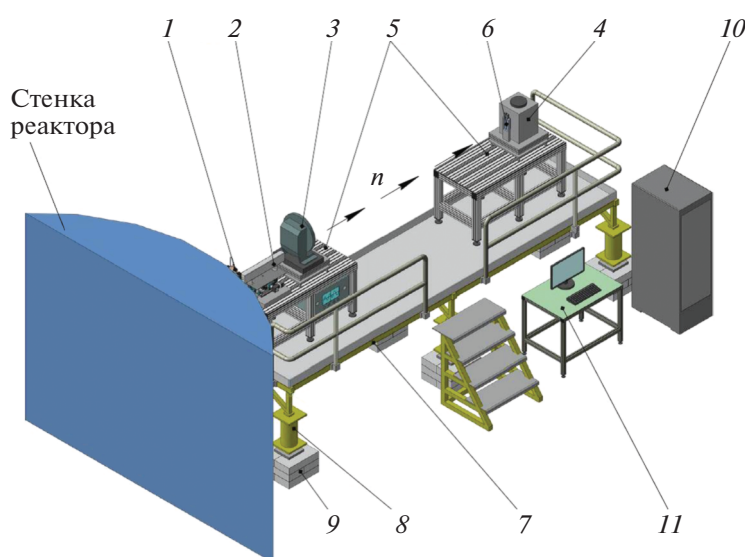


Рис. 8. Схема времяпролетного спектрометра на канале ГЭК-9: 1 – формирователь пучка, 2 – отражающее зеркало, 3 – прерыватель, 4 – детектор, 5 – юстировочные столы, 6 – коллиматор, 7 – платформа, 8 – юстировочные опорные столбы, 9 – виброопоры спектрометра, 10 – управляющий модуль, 11 – рабочее место оператора установки.

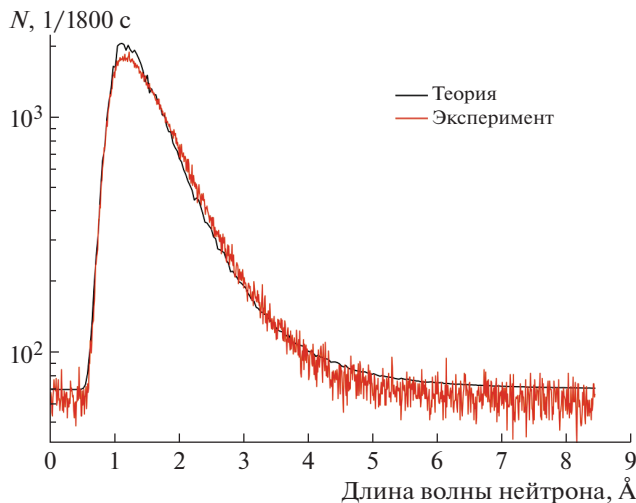


Рис. 9. Сравнение теоретического и экспериментального спектров тепловых нейтронов канала ГЭК-9 реактора ПИК.

осуществлен вывод реактора на мощность 100 кВт и первый пробный эксперимент на выведенном пучке нейтронов. Измерен спектр тепловых нейтронов канала ГЭК-9. Схема эксперимента приведена на рис. 8. Результаты измерений совпали с теоретическими ожиданиями (рис. 9). Дальнейшие планы по достижению ключевых событий на реакторном комплексе ПИК приведены на рис. 10. Итогом этой деятельности станет полноценный реакторный комплекс, оснащенный всем необходимым оборудованием для проведения исследований на выведенных пучках нейтронов. Более подробно состав и планы по реализации этой грандиозной задачи изложены в четырех томах, изданных в 2015 г. под редакцией В.Л. Аксенова и М.В. Ковальчука [2–5].

Авторы выражают благодарность сотрудникам, принявшим участие в подготовке данного обзора, В.В. Воронину, С.Е. Горчакову, А.С. Захарову, Ю.М. Кириенко, В.А. Ульянову.

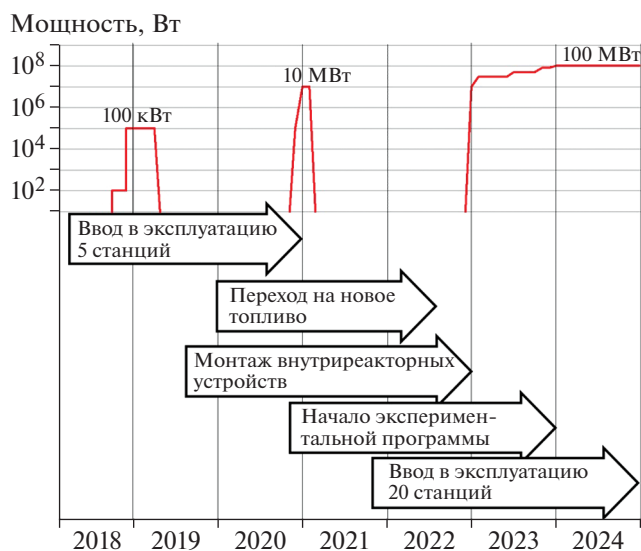


Рис. 10. График вывода реактора ПИК на проектную мощность и достижения ключевых событий.

исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг. проводится поэтапный выход реактора на проектную мощность. В конце 2018–начале 2019 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерыкалов А.Н., Каминкер Д.М., Коноплев К.А. и др. // Физика ядерных реакторов. Калуга: Изд-во ФЭИ, 1966. Т. III. С. 273.
2. Аксенов В.Л., Ковальчук М.В. Реакторный комплекс ПИК. Т. 1. Концепция инвестиционного проекта “Модернизация инженерно-технических систем обеспечения эксплуатации реактора ПИК и его научных станций”. Гатчина: Изд-во ФГБУ ПИЯФ НИЦ “Курчатовский институт”, 2015. 115 с.
3. Аксенов В.Л., Ковальчук М.В. Реакторный комплекс ПИК. Т. 2. Научное обоснование комплекса экспериментальных установок на реакторе ПИК. Гатчина: Изд-во ФГБУ ПИЯФ НИЦ “Курчатовский институт”, 2015. 196 с.
4. Аксенов В.Л., Ковальчук М.В. Реакторный комплекс ПИК. Т. 3. Концепция инвестиционного проекта “Реконструкция лабораторного комплекса реакторного комплекса ПИК”. Гатчина: Изд-во ФГБУ ПИЯФ НИЦ “Курчатовский институт”, 2015. 67 с.
5. Аксенов В.Л., Ковальчук М.В. Реакторный комплекс ПИК. Т. 4. Концепция инвестиционного проекта “Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК”. Гатчина: Изд-во ФГБУ ПИЯФ НИЦ “Курчатовский институт”, 2015. 79 с.