

УДК 53.082.79

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РЕАКТОР ПИК. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

© 2022 г. М. В. Ковальчук¹, В. В. Воронин^{2,*}, С. В. Гаврилов², А. В. Гартвик², М. В. Дьячков²,
Д. А. Ипатов², В. А. Матвеев², В. В. Тарнавич², В. А. Ульянов²

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: Voronin_VV@npi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 31.03.2022 г.

Принята к публикации 31.03.2022 г.

Описаны параметры и состояние дел по созданию самого мощного источника нейтронов исследовательского реактора ПИК (НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Гатчина). Приведены результаты первых экспериментов на выведенных пучках нейтронов, проведенных на этапе вывода реактора ПИК на энергетический режим работы. Выведенный на проектные параметры научно-исследовательский реакторный комплекс ПИК на несколько десятилетий определит стратегию развития нейтронных исследований в Российской Федерации и станет основой Международного центра нейтронных исследований.

DOI: 10.31857/S0023476122050095

ВВЕДЕНИЕ

Реактор ПИК (пучковый исследовательский корпусной) (рис. 1) был задуман и спроектирован в начале 1970-х годов как источник нейтронных пучков самой высокой интенсивности. Удачная схема компоновки реактора, предложенная для

реактора ПИК в 1966 г. [1], в дальнейшем стала использоваться практически во всех пучковых реакторах с тяжеловодным отражателем. Драматичная история создания реактора, изложенная в [2], продолжалась более 40 лет.



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

Ситуация начала меняться в 2010 г., когда по инициативе М.В. Ковальчука НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ включили в Программу совместной деятельности организаций, участвующих в составе Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”. В результате в 2011 г. был осуществлен физический пуск реактора на мощности 100 Вт, который подтвердил нейтронно-физические параметры реактора, полученные в ходе расчетов, а также экспериментально на критическом стенде “Физмодель реактора 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.

В 2018 г. проведено испытание систем реактора на мощности до 100 кВт – первого этапа Программы энергетического пуска.

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.

Все этапы освоения мощности, ввода новых систем и научного оборудования ведутся под постоянным государственным надзором регионального органа Ростехнадзора в рамках лицензии на эксплуатацию, выданной его центральным аппаратом.

В конце 2020 г. введены в эксплуатацию пять экспериментальных станций первой очереди для проведения экспериментов на выведенных пучках нейтронов.

В 2021 г. осуществлен переход реактора на энергетический режим работы этапа освоения мощности реактора до 10 МВт. В марте 2022 г. была достигнута мощность реактора 7 МВт, что подтвердило высокую квалификацию персонала и продемонстрировало устойчивую и надежную работу реактора и технологических систем.

Идет подготовка к переходу от пусковой активной зоны к эксплуатационному комплексу тепловыделяющих сборок, обеспечивающих удовлетворительную длительность цикла работы реактора порядка 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. В настоящее время ведется подготовка к заключению контракта с пред-

приятиями АО “ТВЭЛ” Госкорпорации “Росатом” на поставку первой партии нового топлива в 2023 г.

Параллельно с увеличением мощности реактора идет создание комплекса экспериментального оборудования для проведения научных экспериментов.

Наиболее эффективное использование источника нейтронного излучения возможно, если высокоэффективные пучки нейтронов, выводимые из высокопоточного реактора, доставляются без потерь к ультрасовременным экспериментальным установкам, позволяющим проводить самые передовые исследования во всех перечисленных выше областях. Поэтому обе составляющие, т.е. высокая производительность самого источника нейтронов и современный уровень приборной базы, имеют равное значение для успешной реализации научных программ Международного центра нейтронных исследований на реакторе ПИК. Таким образом, один из основных принципов общей концепции создания экспериментальных станций – совершенствование приборной базы – должен “идти рука об руку” с совершенствованием источника.

Работы по оснащению реактора ПИК комплексом современного оборудования осуществляются в рамках двух проектов: “Реконструкция лабораторного комплекса научно-исследовательского реакторного комплекса ПИК” (сроки выполнения 2017–2020 гг.), “Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК” (сроки выполнения 2019–2024 гг.). В результате реализации этих проектов будет создан научно-исследовательский комплекс, оснащенный 25 нейтронными станциями, источником холодных нейтронов, источником горячих нейтронов и источником ультрахолодных нейтронов, что позволит удовлетворять запросы на нейтронные исследования как со стороны научно-технического комплекса России, так и со стороны значительной части европейских партнеров на долгие годы. Десять нейтронных систем позволяют транспортировать нейтроны к 17 экспериментальным установкам, расположенным в нейтронном зале в низкофоновых условиях. Всего в трех экспериментальных залах комплекса планируется обеспечить до 50 позиций на пучках, на которых одновременно могут вести эксперименты различные исследовательские группы. Подробное описание приборной программы реакторного комплекса ПИК изложено в [3].

ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА ПИК

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

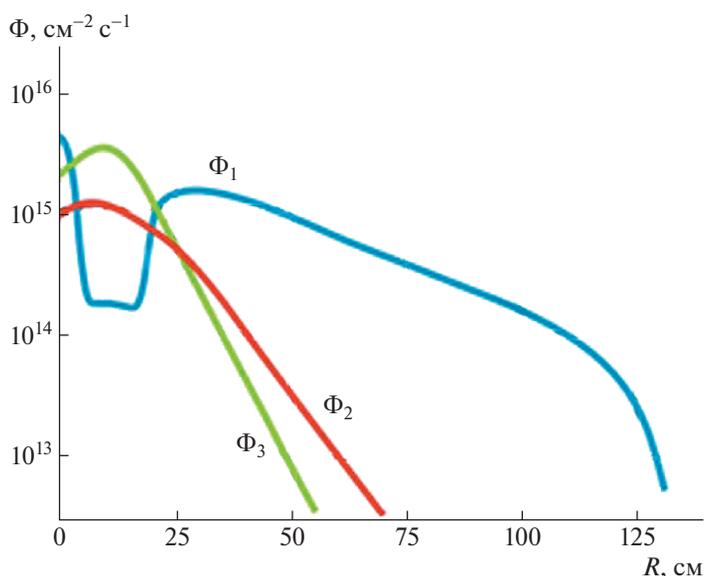


Рис. 2. Распределение нейтронных потоков: Φ_1 — поток тепловых нейтронов, $E < 0.6$ кэВ; Φ_2 — поток эпитепловых нейтронов, $0.6 < E < 5$ кэВ; Φ_3 — поток быстрых нейтронов, $E > 5$ кэВ.

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. 2). Активная зона размещается в корпусе реактора и охлаждается легкой водой под давлением 5 МПа. Корпус реактора, в свою очередь, помещен в бак отражателя, заполненный тяжелой водой. Подробно параметры реактора и его характеристики изложены в [2].

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 500 мм высотой топлива.

Для вывода нейтронного излучения из отражателя реактора ПИК, а также облучения образцов реактор ПИК снабжен значительным числом экспериментальных каналов (рис. 3). 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 выходе $(0.2-3) \times 10^{11}$ н/см²·с; диаметры — 100–250 мм; наклонные экспериментальные каналы (НЭК) — шесть штук; 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 экспериментальным станциям в нейтронноводном зале осуществляется по специальным нейтронноводам в количестве 10 штук. Затем возможно ветвление для увеличения числа пучковых позиций, общая длина ~ 1200 м. Потоки нейтронов на выходе нейтронноводов $(0.1-1.3) \times 10^{10}$ н/см²·с.

Таким образом, по отношению к существующим исследовательским реакторам 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.

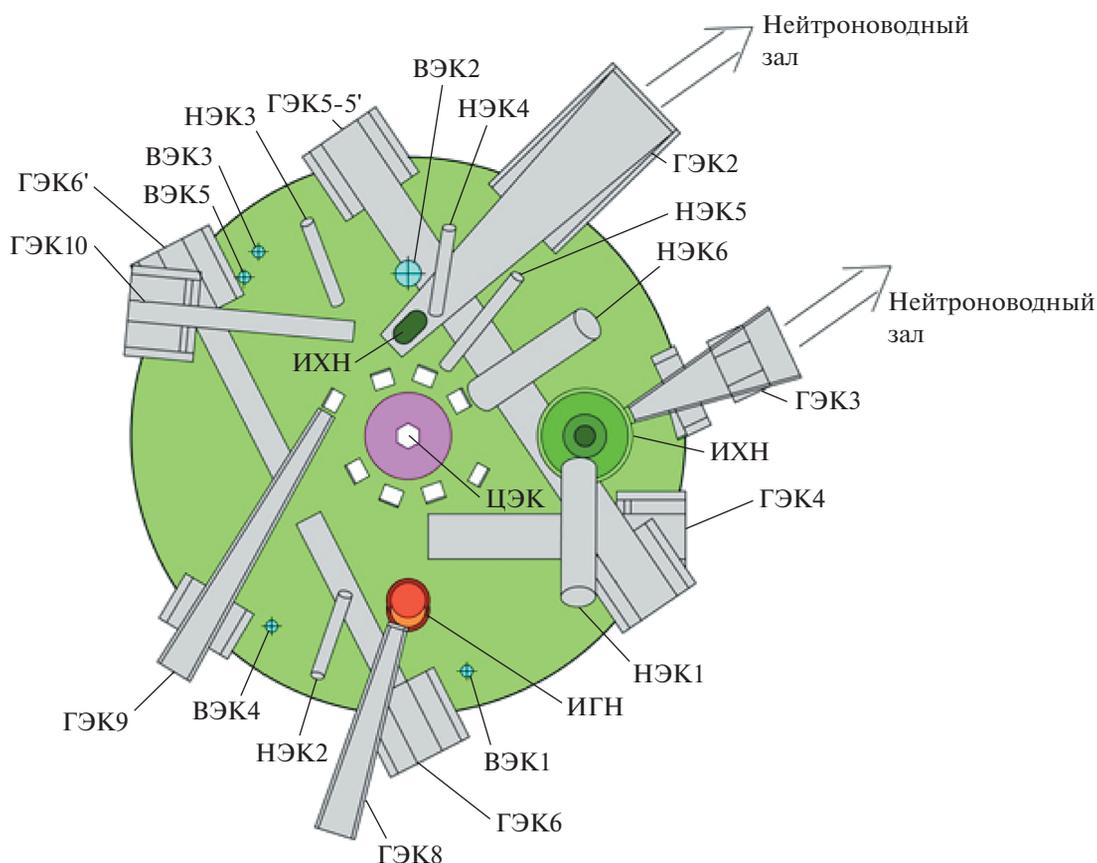


Рис. 3. Схема экспериментальных каналов реактора ПИК.

Совершенствуются приборы и возрастают требования к интенсивности нейтронных пучков.

По параметрам нейтронных пучков и экспериментальным возможностям реактор ПИК будет превосходить все действующие исследовательские реакторы.

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКАХ НЕЙТРОНОВ

В декабре 2020 г. пять исследовательских станций реакторного комплекса ПИК были введены в эксплуатацию. К ним относятся:

- тестовый нейтронный рефлектометр (ТНР), предназначенный для испытаний нейтронных поляризующих и неполяризованных зеркал нейтронных каналов и других нейтронно-оптических устройств, в том числе для прикладных задач самого реакторного комплекса;

- текстурный дифрактометр ТЕХ-3 для задач текстурной дифрактометрии, в том числе прикладных исследований текстуры конструкционных и технических материалов;

- дифрактометр поляризованных нейтронов (ДПН) для исследований особенностей магнитного упорядочения в кристаллических структурах;

- рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2 для исследований поверхностных структур, границ раздела, тонких пленок и многослойных структур как магнитных, так и немагнитных материалов;

- тестовый нейтронный спектрометр Т-Спектр для измерений времяпролетным методом нейтронного спектра на выходе экспериментальных каналов реактора и нейтронных каналов.

Экспериментальные работы на станциях проводились на этапе перехода реактора на энергетический режим работы, предполагающий выход на тепловую мощность 10 МВт. К ним относятся серия методических экспериментов, таких как измерение абсолютного нейтронного потока на горизонтальном экспериментальном канале № 10, изучение характеристик четырехмодового формирователя (поляризатора) нейтронного пучка на рефлектометре ТНР, изучение характеристик нейтронно-оптического формирователя (поляризатора) на рефлектометре NERO-2 и другие.

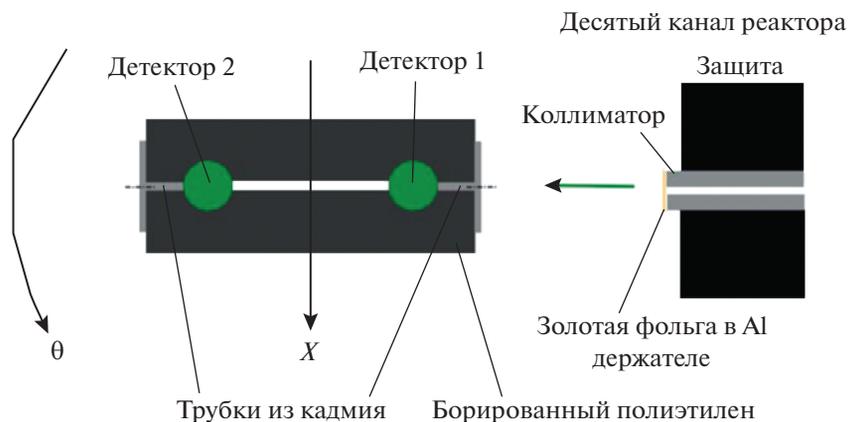


Рис. 4. Экспериментальная схема измерения абсолютного потока на канале ГЭК-10.

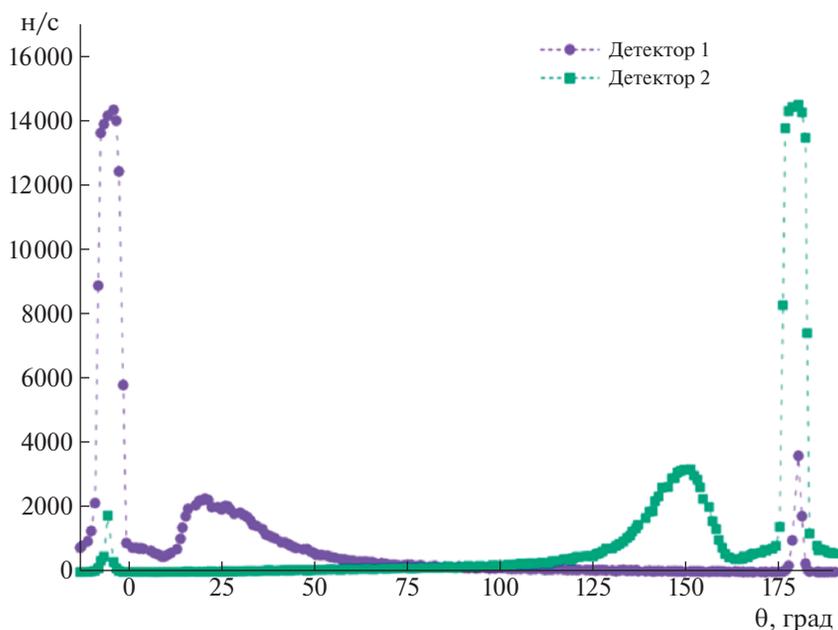


Рис. 5. Азимутальное сканирование по углу θ .

Измерение абсолютного нейтронного потока проводили двумя независимыми методами, включающими в себя измерение плотности нейтронного пучка методом активации золотых фольг и с помощью пропорциональных счетчиков. Экспериментальная схема представлена на рис. 4.

Конструкция располагалась в защите монохроматора установки ТЕХ-3 [4] и представляла собой два детектора в виде пропорциональных счетчиков, помещенных в борированный полиэтилен. Между детекторами в полиэтилене для прохождения пучка на второй детектор размещался канал диаметром 5 мм. Нейтронный пучок формируется коллиматором, расположенным в разборной защите реактора. Вся конструкция

располагалась на столике перемещения с возможностью азимутального вращения (угол θ).

На рис. 5 представлены результаты азимутального сканирования по углу θ вокруг оси ортогональной плоскости рис. 4. Два максимума интенсивности, регистрируемой детекторами 1 и 2, соответствуют двум рабочим позициям, на которых проводили основные измерения (“позиция 1” и “позиция 2”).

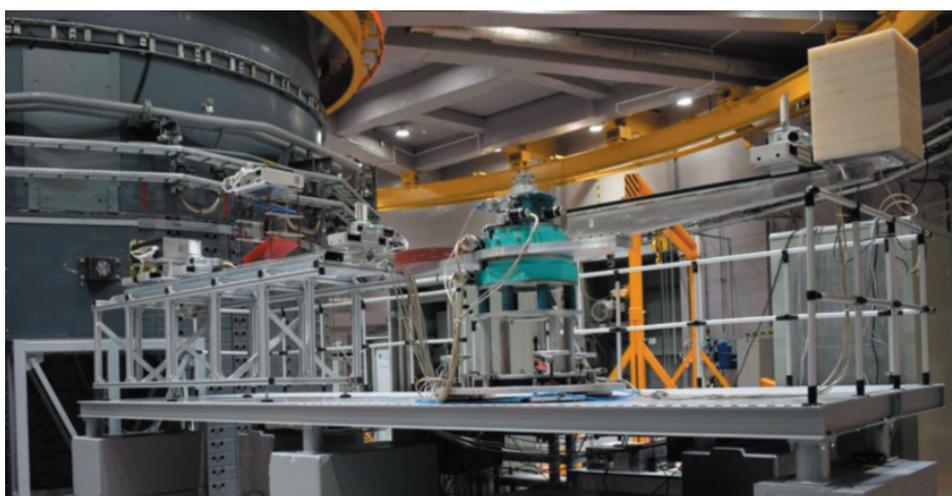
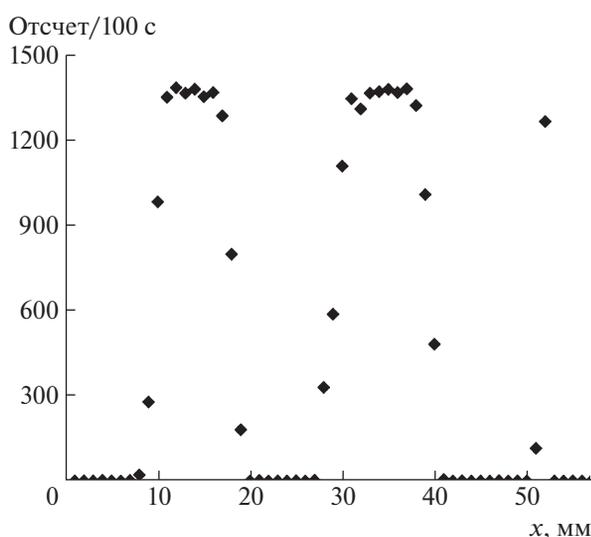
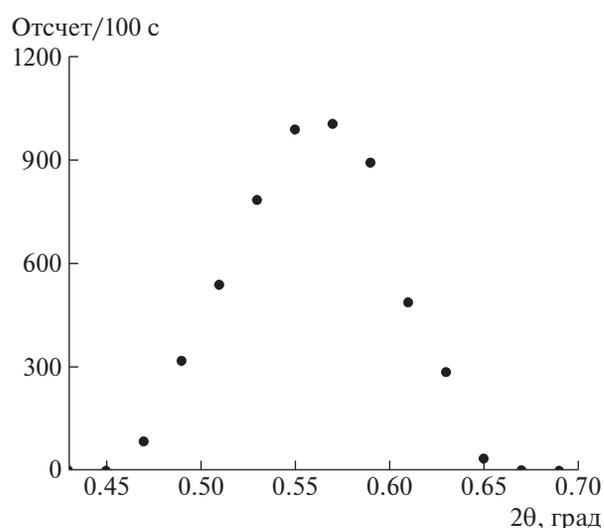
Таким образом, в результате проведенных экспериментов двумя независимыми методами впервые был измерен поток тепловых нейтронов на выходе ГЭК-10 реактора ПИК. Поток составил $\sim 10^6$ н/с/см² при мощности реактора 100 кВт, что совпало с теоретической оценкой. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Измеренные значения

Позиция	Детектор 1, н/с	Детектор 2, н/с	Детектор 1, н/с/см ²	Детектор 2, н/с/см ²	На фольге, н/с/см ²
1	12447.27	887.76	8.29×10^5	0.59×10^5	1.3×10^6
2	871.01	12735.79	0.58×10^5	8.48×10^5	

На рис. 6 представлено фото рефлектометра поляризованных нейтронов NERO-2. Результаты нейтронно-физических испытаний на станции “рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2” включали, в том числе, настройку созданного нейтронно-оптического формирователя. Результаты первых измерений, проведенных на

NERO-2, доложены на конференции РНИКС-2021 [4]. Нейтронно-оптический формирователь был предварительно отъюстирован с помощью лазерного источника. Далее было проведено сканирование положения формирователя поперек оси нейтронного пучка с целью определения координат каналов (рис. 7).

**Рис. 6.** Рефлектометр поляризованных нейтронов NERO-2.**Рис. 7.** Зависимость интенсивности нейтронного излучения, регистрируемой детектором, от положения нейтронно-оптического формирователя.**Рис. 8.** Угловой профиль нейтронного пучка, отраженный от суперзеркала Ni/Ti ($m = 2$), неполяризуемого канала формирователя.

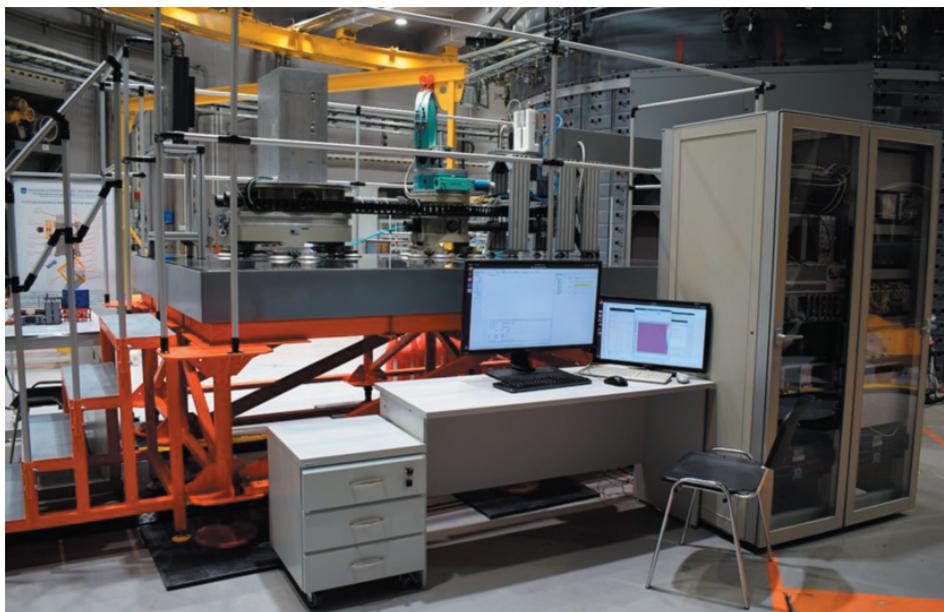


Рис. 9. Текстуальный дифрактометр TEX-3.

По результатам сканирования, представленным на рис. 7, определены границы каналов:

- технологический (юстировочный) канал без оптики: $x = 52$ мм, ширина 1 мм;
- полярирующий канал (суперзеркало FeCo/TiZr, $m = 2$): $x = 29$ –39 мм, ширина 10 мм;
- неполярирующий канал (суперзеркало Ni/Ti, $m = 2$): $x = 8$ –18 мм, ширина 10 мм.

Путем сканирования положения формирователя поперек оси нейтронного пучка и качания вокруг вертикальной оси была определена рабочая позиция суперзеркала неполярирующего канала. На рис. 8 приведен профиль углового распределения интенсивности нейтронов, отражаемых от суперзеркала Ni/Ti ($m = 2$) неполярирующего канала формирователя рефлектометра.

На рис. 9 показан текстуальный дифрактометр TEX-3. Общее описание TEX-3 представлено в [5].

На дифрактометре TEX-3 была проведена модернизация по установке энкодеров на привод механизмов поворота узла детектора относительно узла образца, что позволило контролировать перемещения и работоспособности системы питания воздухом пневмопор. Проведена серия измерений, в том числе изучение зависимости интенсивности нейтронного пучка от углового расположения монохроматора вокруг вертикальной оси (при мощности 400 кВт), изучение зависимости интенсивности нейтронного пучка от поперечного смещения детектора относительно максимума, при мощностях 400 и 800 кВт (рис. 10).

Тестовый нейтронный рефлектометр размещен на канале ГЭК-9. Нейтронный спектр вы-

ходного пучка, отфильтрованный от быстрых нейтронов суперзеркалом, был предварительно измерен времяпролетным методом [6]. Далее на ТНР последовательно проводилась юстировка основных оптических устройств. Результаты были доложены на конференции РНИКС-2021 [7]. В частности, была проведена юстировка по нейтронному пучку одного из основных узлов, а именно четырехмодового формирователя (поля-

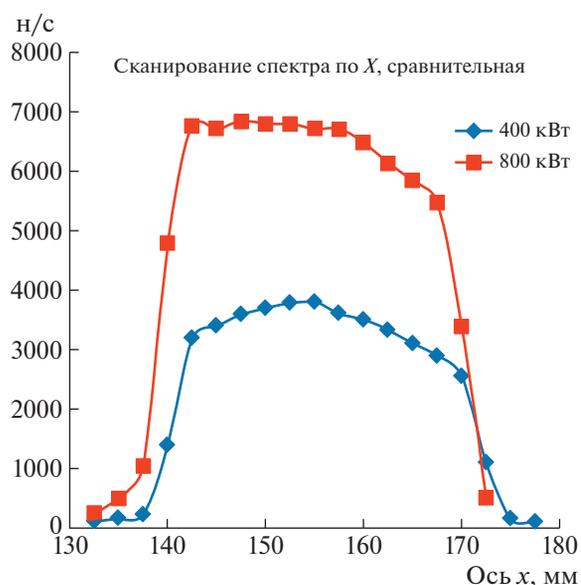


Рис. 10. Зависимость интенсивности детектора от поперечного смещения относительно максимума на мощностях 400–800 кВт (диафрагма 30×30 мм).



Рис. 11. Тестовый нейтронный рефлектометр.

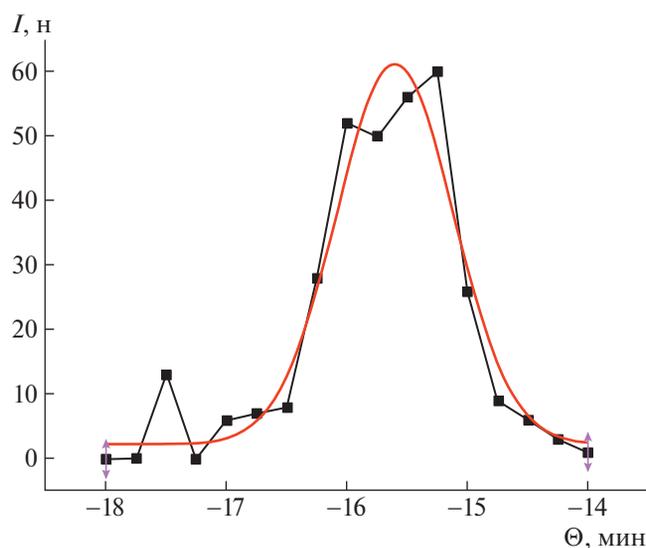


Рис. 12. Профиль пучка, отраженного от зеркала 2 четырехмодового формирователя (монохроматический неполяризуемый канал). Профиль пучка получен сканированием детектора с тонкой диафрагмой 0.2 мм.

ризатора) с целью проверки его характеристик. Для точной юстировки каналов перед формирователем была установлена диафрагма шириной 0.5 мм. Изображение самой установки представлено на рис. 11.

Формирователь устанавливали так, чтобы пучок в неполяризуемой монохроматической моде однократно отражался от зеркала. После оптимизации координаты положения формирователя при перемещении поперек пучка с использованием тонкой диафрагмы (0.2 мм) при мощности 60 кВт на детекторе был снят профиль пучка, от-

раженного от зеркального монохроматора NiMo/Ti (рис. 12).

Времяпролетный спектр прямого пучка третьей и второй мод формирователя был снят на мощностях ~400 и 800 кВт соответственно (рис. 13).

На рис. 14 представлен тестовый спектрометр Т-Спектр. При калибровке спектрометра по времени пролета нейтронов получены времяпролетные спектры канала ГЭК-3 сквозь кадмиевый (ядерный, преимущественно поглощающий) и бериллиевый (поликристаллический, преимущественно рассеивающий) нейтронные фильтры. Измерения проводили на некалиброванной мощ-

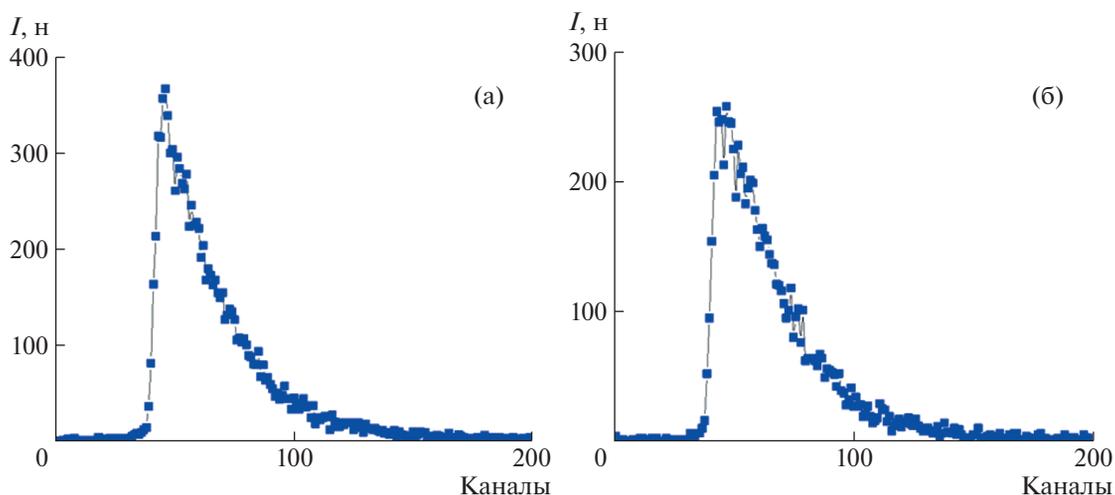


Рис. 13. Спектр второй (а) моды (белый неполярирующий канал) формирователя и третьей (б) моды (белый полярирующий канал).



Рис. 14. Тестовый спектрометр Т-Спектр.

ности реактора 85 кВт с оценкой по одному каналу. В качестве примера представлены результаты калибровки по бериллиевому фильтру, рис. 15. Полученные результаты говорят о полной работоспособности аппаратного обеспечения инструмента.

ВЫВОДЫ

В настоящее время проводится плановый и поэтапный вывод реактора ПИК на проектную мощность 100 МВт, параллельно с этим идет создание комплекса экспериментального оборудо-

вания для проведения исследований на выведенных пучках нейтронов, которое должно завершиться к концу 2024 г. Результаты первых экспериментов, проведенных на этапе выхода реактора на энергетический режим работы, совпадают с теоретическими ожиданиями и подтверждают проектные параметры реактора ПИК.

Авторы выражают благодарность службам эксплуатации реактора ПИК, которые обеспечили проведение исследований, а также сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, принявшим участие в работах и подготовке публика-

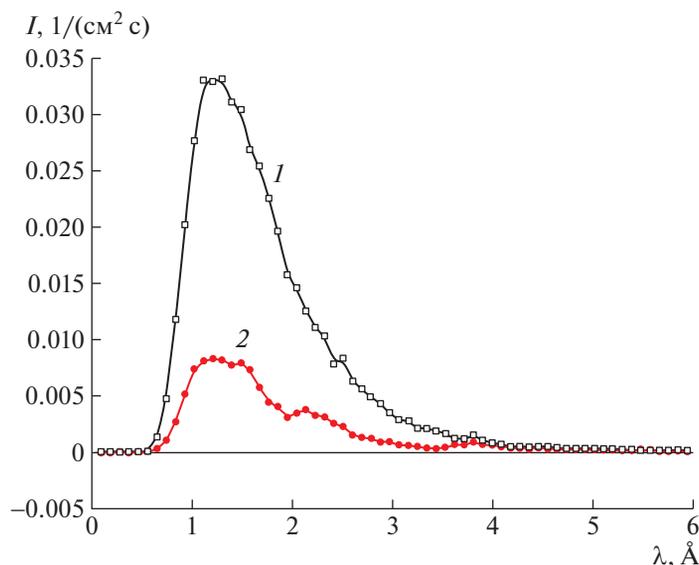


Рис. 15. Спектры открытого пучка (1) и пучка, прошедшего сквозь поликристаллический Ве-фильтр толщиной 3.7 г/см^2 (2) в линейном масштабе.

ции, В.Г. Сыромятникову, К.А. Пшеничному, А.О. Полюшкину, М.Р. Колхидашвили.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерыкалов А.Н., Каминкер Д.М., Коноплев К.А. и др. // Физика ядерных реакторов. Обнинск: Изд-во ФЭИ, 1966. Т. III. С. 273.
2. Ковальчук М.В., Смольский С.Л., Коноплев К.А. // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 2. С. 183. <https://doi.org/10.31857/S0023476121020053>
3. Ковальчук М.В., Воронин В.В., Григорьев С.В., Серебров А.П. // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 2. С. 191. <https://doi.org/10.31857/S0023476121020065>
4. Didenko G.P., Ipatov D.A., Kovalenko N.A. et al. // J. Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2020. V. 14. P. S144.
5. Матвеев В.А., Плешанов Н.К., Головастов Д.С., Сузов А.В. // Тез. докл. конф. по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированных сред (РНИКС-2021). 2021. С. 250.
6. Ulyanov V.A., Tarnavich V.V., Syromyatnikov V.G. et al. // Eur. Conf. On Neutron Scatt., St. Petersburg, Russia. Abstract Book. 2019. P. 321.
7. Дьячков М.В., Ульянов В.А., Сыромятников В.Г. и др. // Тез. докл. конф. по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированных сред (РНИКС-2021). 2021. С. 244.