

СТРАТЕГИЯ ОСНАЩЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК РЕАКТОРА ПИК ДЕТЕКТОРНЫМИ СИСТЕМАМИ НЕЙТРОНОВ

*А. Г. Крившич **

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, Россия

Анализ приборного парка реактора ПИК (НИЦ КИ ПИЯФ, Россия) с точки зрения обеспечения требуемых рабочих параметров детекторов нейтронов был осуществлен на основании анализа приборного парка детекторов и стратегических тенденций их развития в ведущих мировых центрах нейтронных исследований, а также в аналогичных центрах России за более чем 60-летний период. Предпринята попытка предсказать развитие нейтронных детекторных технологий на ближайшие 10–15 лет. Представлена стратегия, позволяющая достичь требуемых параметров с помощью новых разработок детекторов. Она основана на том, чтобы иметь возможность производить детекторы с оптимальными параметрами, что сделает установки реактора ПИК одними из лучших в мире.

Analysis of the PIK reactor (PNPI, Russia) instrumental facility with regard to compliance of the neutron detectors with all the required operation parameters was performed based on analysis of detectors and strategic trends of their development in leading neutron research centers of the world and analogous centers in Russia over the period of more than 60 years. An attempt is made to estimate the development of the neutron detector technologies for the next 10–15 years. A strategy outline as to how these requirements might be tackled by novel detector developments is shown. This strategy has at its basis to be able to produce optimally performing detectors that allow the PIK reactor instruments to be the world-leading.

PACS: 29.40.Cs; 9.40.Gx; 28.50.Dg; 28.50.Ky

ВВЕДЕНИЕ

В Федеральном государственном бюджетном учреждении «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (далее НИЦ КИ ПИЯФ) вступило в завершающую фазу строительство реактора ПИК.

* E-mail: krivshich_ag@pnpi.nrcki.ru

Оснащение реактора современными системами детектирования нейтронов, создаваемыми в России и в мире, вызвано необходимостью развития и применения новых методов исследования как для изучения новых классов объектов, так и для решения экспериментальных задач на принципиально высоком уровне. Качество получаемой в современном эксперименте информации зачастую прямо зависит от практической реализации комплекса взаимосвязанных (а иногда и противоречащих друг другу) предельно достижимых параметров системы детектирования. К ним относятся большая площадь регистрации, высокие грузочная способность и пространственное разрешение, низкий уровень шума, высокая эффективность во всем требуемом диапазоне длин волн, очень низкая чувствительность к фоновому излучению, высокая стабильность рабочих характеристик, а также низкая стоимость и ремонтпригодность.

Целью настоящей работы является выработка стратегии оснащения экспериментальных установок реактора ПИК детекторными системами. Концепция создания детекторов нейтронов для экспериментальных установок реактора ПИК должна опираться на опыт, накопленный в ведущих зарубежных и российских центрах нейтронных исследований, таких как ILL (Франция), J-PARC (Япония), ESS (Швеция), Исследовательский центр в Юлихе (Германия) и т. д.

1. АНАЛИЗ ОПЫТА СОЗДАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОНОВ, НАКОПЛЕННОГО В МИРОВЫХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРАХ

1.1. За последние 40 лет. Анализ опыта ILL (Франция). При создании детекторов нейтронов для экспериментальных установок реактора ПИК необходимо учитывать мировой опыт, знания и опыт экспертов, работающих в области создания детекторов нейтронов различных типов.

ILL в настоящее время является неформальной мировой столицей нейтронных исследований [1]. В этом институте опыт проведения экспериментов с нейтронами накапливался более 40 лет с участием ведущих специалистов из многих стран. За это время были созданы уникальные экспериментальные установки мирового класса, а их параметры оптимизированы на основе моделирования и экспериментов.

В основных нейтронных центрах мира структура приборной базы по назначению примерно такая же, как в ILL. Реактор ПИК сопоставим с реактором HFR в ILL по плотности нейтронных потоков и по существу является будущим преемником реактора HFR. В ILL многие приборы доведены до совершенства и их параметры оптимизированы на основе моделирования, реальных тестов и экспериментов. Классификация типов детекторов, используемых на экспериментальных установках ILL, и детекторных технологий приведена в табл. 1 и в работе [2].

Видно, что, несмотря на дефицит ^3He , в ведущем европейском центре нейтронных исследований ILL абсолютное большинство установок (43 из 47) используют детекторы с газом — конвертер ^3He .

Таблица 1. Классификация типов детекторов, используемых в ILL (Франция)

Детекторная технология	Тип детектора	Количество
Газоразрядные детекторы на базе конвертера ^3He	Пропорциональные счетчики (^3He)	9
	Мультидетекторы и сборки на основе пропорциональных счетчиков	14
	Одно- и многомодульные микростриповые детекторы (MSGC)	6
	^3He 2D ПЧД	10
	Мониторы нейтронных пучков	4
	<i>Итого</i>	43
Сцинтилляционные детекторы на базе твердотельных конвертеров (^6Li и ^{10}B)	Сцинтилляционные детекторы на базе ZnS/LiF	2
	Сцинтилляционные детекторы ImagePlates	2
	<i>Итого</i>	4

1.2. Современное состояние за последние 10 лет. Анализ опыта исследовательского центра J-PARC (Япония). В J-PARC создан центр нейтронных исследований MLF (Materials and Life Science Experimental Facility) [3], который проводит работы на базе высокоинтенсивного импульсного источника нейтронов, создаваемых протонным пучком с энергий 3 ГэВ, током 333 мкА и частотой 25 Гц.

Реализация новых научных и прикладных программ исследований потребовала создания новых экспериментальных установок, оснащенных новыми детекторами. Анализ показал, что в случае использования ^3He -детекторов необходимо будет приобрести более 10 000 л этого газа, что с учетом роста его стоимости потребует серьезных финансовых вложений — более 20 млн долл. в течение 5 лет.

Поэтому было принято решение об использовании сцинтилляционных технологий для детекторов, имеющих сложную геометрическую поверхность и большую апертуру (5 установок). Для достижения требуемых параметров детекторов в J-PARC отказались от применения стандартных сцинтилляторов на базе ZnS/ ^6LiF и перешли к керамическим сцинтилляторам на базе ZnS/ $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$. Это позволило несколько улучшить параметры существующих сцинтилляционных детекторов в части увеличения их быстродействия, эффективности, уменьшения послесвечивости и т. д. При этом эффективность сцинтилляционных детекторов не превысила 70% от эффективности ^3He -детекторов (4 атм). Эта работа потребовала создания в J-PARC новой «сцинтилляционной» инфраструктуры и более 10 лет напряженной работы.

В настоящее время на установках J-PARC сложилась, пожалуй, наиболее сбалансированная ситуация с точки зрения применяемых детекторов различных типов. Экспериментальные установки, в составе которых применяются различные детекторы, наглядно представлены на

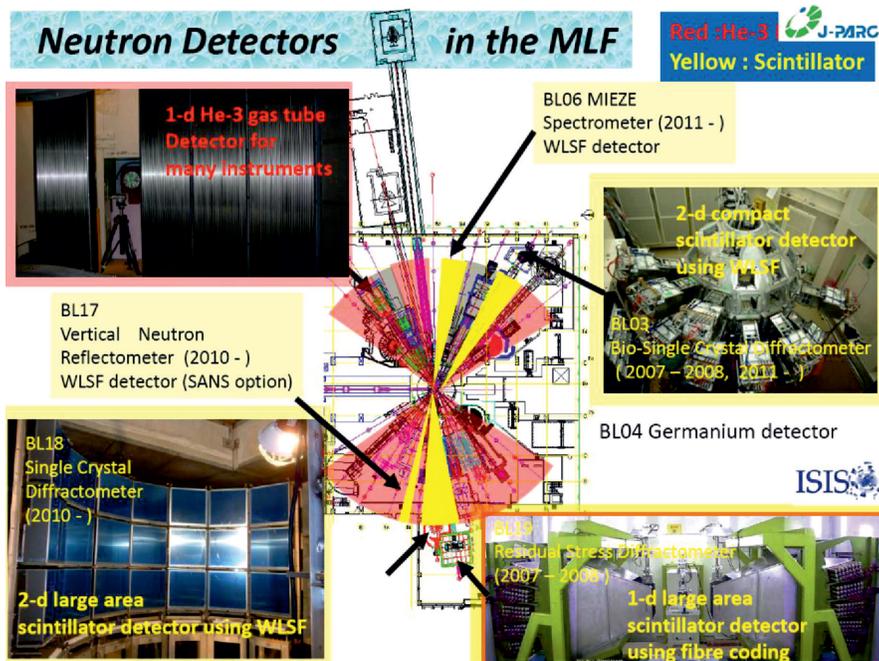


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Размещение и структура нейтронных детекторов на экспериментальных установках MLF (J-PARC)

рис. 1 (установки со сцинтилляционными детекторами выделены желтым цветом, а с ^3He -детекторами — красным) [4]. Видно, что большинство детекторов — это ^3He -детекторы. Они применяются для «покрытия» больших площадей, работы в высокоинтенсивных нейтронных полях — до $1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, работы с относительно небольшими апертурами (до $300 \times 300 \text{ мм}$), когда для удешевления применяется метод съема информации на линию задержки (при этом число каналов регистрирующей электроники составляет всего 5).

Центр J-PARC оснащен 21 экспериментальной установкой, большинство из них (около 75 %) используют газонаполненные ^3He -детекторы.

1.3. Оценка мировых трендов на последующие 10–15 лет. Анализ опыта исследовательского центра ESS (Швеция). Европейский нейтронный источник (ESS) активно сооружается вблизи г. Лунда (Швеция). Планируется, что ESS, включая первую очередь экспериментальных установок, будет принят в эксплуатацию не позже 2025 г. Для анализа технических требований как к экспериментальным установкам, так и к входящим в их состав детекторам нейтронов в ESS была создана международная экспертная группа. Представленный здесь анализ осно-

ван на первой очереди из 22 установок, описанных в отчете о проектном задании ESS (ESS TDR) в 2013 г. [5–7].

Оказалось, что общая площадь детекторов нейтронов превышает 280 м². Более половины площади приходится на 3 установки — Chopper spectrometers (80, 50 и 30 м²). Общее число каналов регистрирующей электроники также очень велико и превышает 60 000. Существенно отметить, что только 2 экспериментальные установки должны иметь высокое пространственное разрешение — 0,1 мм. Пространственное разрешение других детекторов находится в диапазоне 1–10 мм, что вполне реализуемо имеющимися технологиями. Основной проблемой для детекторов нейтронов в ESS является очень быстрое изменение окружения.

При анализе все детекторы были разбиты на 4 категории по площади регистрации: детекторы большой площади (2 установки), детекторы средней площади и с высоким пространственным разрешением (9 установок), детекторы малой площади (1 м² и менее) (9 установок) и детекторы с ультравысоким разрешением (2 установки).

Детекторы, входящие в первые две категории, занимают около 90 % площади всех детекторов. Если их создавать с использованием ³He-технологии, то это потребует приобретения более 25 000 л ³He, что в сегодняшних европейских ценах составляет весьма большую сумму — около 50 млн долл. США. Стремление принципиально сократить финансовые затраты на приобретение ³He однозначно продиктовало следующий выбор стратегии создания детекторов:

- первые две категории базировать на тех типах детекторов, которые не используют ³He;

- большинство из 9 детекторов малой площади (категория 3) базировать на ³He-детекторах, стремясь при этом обеспечить предельно достижимые параметры. Это 9 из 22 экспериментальных установок (40 %);

- детекторы с ультравысоким разрешением могут быть реализованы на базе сцинтилляционных и газонаполненных детекторов GEM или Micromegas.

Создание детекторов, не использующих ³He, будет развиваться по следующим трем базовым направлениям, что требует серьезных финансовых вложений в их разработку и серьезных усилий международного сообщества [5–7]:

- ⁶LiF/ZnS и B₂O₃/ZnS сцинтилляционные детекторы с WLSF-считыванием информации;

- газовые детекторы с твердотельным конвертером ¹⁰B;

- позиционно-чувствительные газовые детекторы на базе BF₃.

Для ESS было решено выбрать газовые детекторы на основе твердотельного конвертера ¹⁰B в качестве технологии, пришедшей на смену ³He.

На пути создания новых детекторных технологий есть еще очень много открытых вопросов и сложных нерешенных проблем, которые и

следует решить для максимального приближения технических параметров новых детекторов к современным детекторам на основе ^3He .

Разработчикам придется ориентироваться на следующие параметры: эффективность новых детекторов должна быть на уровне эквивалента на базе ^3He ; они должны быть работоспособны в высокоинтенсивных пучках нейтронов; ключевой фактор для многих экспериментов — низкая чувствительность к γ -фону, а также существенное уменьшение стоимости детекторов с большой апертурой.

1.4. Современное состояние и тенденции развития детекторов нейтронов в научных центрах в России. Наиболее широко используемые в настоящее время в РФ детекторы для регистрации нейтронов можно разделить на два основных класса: газонаполненные и сцинтилляционные.

Газонаполненные детекторы. Российскими специалистами было отмечено, что в РФ сложились благоприятные условия для создания ПЧД на основе ^3He площадью до 300×300 мм. Разработкой и изготовлением подобных детекторов успешно занимаются группы из НИЦ КИ ПИЯФ (Гатчина) и ЛНФ ОИЯИ (Дубна), накопившие большой практический опыт их изготовления. Такими детекторами начала заниматься и группа из ИЯИ РАН (Троицк). Многолетняя активность в этом направлении позволила разработать стабильные технологии для создания газовых ПЧД. Мощным стимулом для продолжения работ с газовыми ПЧД является относительная доступность ^3He и его меньшая стоимость (по сравнению с мировыми ценами) в России.

Детекторные системы из гелиевых счетчиков работают на экспериментальных установках НЕРА, СКАТ, ЭПСИЛОН, ДН-12, ДИН-2ПИ реактора ИБР-2М Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка (далее — ЛНФ) ОИЯИ, а также на реакторе ВВР-М в НИЦ КИ ПИЯФ. Возможность измерения двух координат за счет взаимно ортогональных катодных плоскостей в пропорциональной камере позволяет использовать 2D ПЧД для измерений методами МУРН. Детекторы данного типа применяются на спектрометрах РЕФЛЕКС, ГРЕЙНС и ДН-2 в ЛНФ ОИЯИ, а также в ИЯИ РАН (Троицк).

Для мониторов нейтронных пучков требуется очень низкая эффективность — обычно в районе одной десятой — одной тысячной процента. Для получения такой эффективности монитор был заполнен газовой смесью 50 мбар ^3He + 950 мбар CF_4 . С помощью данного монитора были измерены профили пучков реактора ИБР-2М. Для работы при сверхвысоких плотностях загрузок ($\geq 1 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) используется смесь с добавлением азота в качестве газа-конвертера.

Сцинтилляционные детекторы. Сцинтилляционная методика особенно привлекательна в спектрометрах нейтронов по времени пролета. Это обусловлено тем, что в сцинтилляционных детекторах, по сравнению с газонаполненными, на порядок меньшая толщина детектирующего

слоя и, как следствие, существенно лучшее разрешение по времени пролета. Более высокая чувствительность сцинтилляционных детекторов к γ -фону не сказывается на результатах времяпролетных экспериментов. Наряду с высокой эффективностью регистрации тепловых нейтронов ($\lambda \leq 1 \text{ \AA}$) и временным разрешением в несколько десятков наносекунд такого рода детекторы способны обеспечить пространственное разрешение порядка 100 мкм.

В разработке такого детектора совместно участвовали, еще в конце 1990-х гг., физики ЛНФ ОИЯИ и ПИЯФ. Дальнейшее развитие данное конструктивное решение нашло в разработке детектора РАСТР для нейтронографической установки Д7а ($\lambda \leq 1,53 \text{ \AA}$, разрешение по межплоскостному расстоянию $\Delta d/d = 0,2-0,3\%$) ИФМ УрО РАН. Накопленный в ЛНФ ОИЯИ опыт по созданию современных сцинтилляционных детекторов является базовым для будущих разработок для реактора ПИК, в которых физики НИЦ КИ ПИЯФ и ЛНФ ОИЯИ будут принимать совместное участие.

1.5. Исследовательский центр (ИЦ) в Юлихе (Германия). ИЦ в Юлихе располагает более чем 30 экспериментальными установками, большинство из которых находятся на FRM-II в Германии, 3 — в ILL, 3 — в SNS, 2 — в стадии строительства [8]. Несколько установок планируется как вклад в ESS. Большинство из этих установок предназначены для исследования процессов упругого (15 установок) и неупругого рассеяния нейтронов (13 установок).

Проведенный анализ показывает, что более 70% установок используют ^3He -детекторы, которые реализуются в виде двухкоординатных ПЧД (апертура — до 500×500 мм, пространственное разрешение — 2 мм) и пропорциональных счетчиков (длина от 100 до 1000 мм).

1.6. Брукхейвенская национальная лаборатория (BNL, США). BNL больше не имеет собственного исследовательского реактора, но ранее там реализовывалась исследовательская программа развития, которая была сконцентрирована на создании высокоточных ПЧД тепловых нейтронов, направленная на оснащение экспериментальных установок по проведению структурных биологических и химических исследований в национальных исследовательских центрах (США) и на SNS [9]. Все детекторы BNL — это ^3He -детекторы на базе пропорциональных камер со съемом информации с катодных стрипов.

1.7. Некоторые другие нейтронные центры. В других центрах, например, в Резерфордской лаборатории (RAL, Великобритания) на источнике ISIS или в Окриджской национальной лаборатории (ORNL, США; импульсный источник SNS и реактор HFIR), соотношение газоразрядных и сцинтилляционных детекторов несколько более сбалансировано. В RAL достигнуты определенные успехи в использовании сцинтилляционных технологий для регистрации нейтронов. На импульсном

испарительном источнике более важно временное разрешение, наряду с лучшей эффективностью для нейтронов с меньшей длиной волны, что является основной мотивацией для более высокой доли сцинтилляционных детекторов для источников испарительного типа.

1.8. Итоговый анализ мировых тенденций развития детекторов нейтронов. Основываясь на результатах анализа опыта работы наиболее значимых зарубежных и российских центров нейтронных исследований и на выявленных тенденциях их развития, можно предложить стратегию создания детекторов нейтронов и оснащения ими экспериментальных установок реактора ПИК. Итоги проведенного анализа и сделанный на его основе прогноз развития детекторных технологий наглядно иллюстрируются стратегией развития детекторов нейтронов за более чем 60-летний период (40 лет (прошлое) + «современный» период (последние 10 лет) + около 10 лет (будущее)) на базе трех крупнейших в мире нейтронных центров.

Мировое нейтронное сообщество по-прежнему рассматривает газоразрядные ^3He -детекторы как базовое направление развития на последующие как минимум 10–15 лет. Это связано с выдающимся сочетанием характеристик детекторов, использующих ^3He в качестве конвертеров нейтронов, что и определило историческую ориентированность нейтронных центров на применение подобных детекторов в экспериментальных установках.

Переход на другие развиваемые сегодня детекторные технологии, имеющие в своей основе конвертеры ^6Li и ^{10}B , в значительной степени носит вынужденный характер и имеет своей целью удешевить приборы, отказавшись от применения ^3He в детекторах большого объема. При этом не должно возникать желания провести массовый «апгрейд» детекторных узлов установок, так как, с одной стороны, это потребует серьезных капиталовложений, а с другой — практически гарантирует ухудшение ряда рабочих характеристик приборов: эффективности регистрации, пространственного разрешения, чувствительности к фоновому γ -излучению и т. д.

Необходим тщательный и всесторонний анализ целесообразности применения той или иной детекторной технологии к конкретной физической задаче, к конкретной физической установке. Так, например, сцинтилляционные детекторы эффективны в случаях, когда требуется получить высокое пространственное разрешение (~ 100 мкм) и сформировать сложную форму регистрирующей поверхности.

2. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ДЕФИЦИТА ^3He

Анализ потребности в ^3He для обеспечения детекторов нейтронов, работающих в составе экспериментальных установок по изучению нейтронного рассеяния практически во всех крупных мировых нейтронных центрах, дан в [2, 10–14] (табл. 2). Надо отметить, что это минимальная

Таблица 2. Анализ потребности в ^3He для ведущих мировых нейтронных центров

Нейтронный центр	Эксплуатация детекторов и научные исследования, л/год	Новые детекторы с маленькой апертурой, л	Новые детекторы с большой апертурой, л
ORNL (SNS)	100	1 300	25 000
ORNL (HFIR)	100	1 210	2 500
Лос-Аламос	100	1 994	12 362
NIST	100	560	40
BNL	50	180	—
FRM-II	100	650	4 500
HZ, Берлин	100	520	7 850
ILL	100	1 000	3 000
JCNS	40	15	7 200
LLB	50	600	600
PSI	50	—	2 000
STFC	100	400	11 300
J-PARC	100	40	16 100
JRR-3	31	71	—
KAERI	150	—	2 000
CSNS	200	—	21 000
<i>Итого</i>	1 471	8 540	115 452
Реактор ПИК	10	900	0

оценка мировой потребности в ^3He . Так, в таблицу не была включена информация по ESS, детекторы которого требуют более 25 000 л ^3He .

Сравнительный анализ данных позволяет утверждать, что потребность экспериментальных установок реактора ПИК в ^3He невелика и составляет около 900 л, что многократно меньше потребности каждого сколько-нибудь значимого национального или международного нейтронного центра.

Около 70% детекторов нейтронов — это ^3He -детекторы, что хорошо согласуется с мировой тенденцией развития. Стоимость ^3He для установок реактора ПИК относительно невелика (разовые вложения ~ 40–50 млн руб.), а преимущества, которые при этом приобретаются центром нейтронных исследований НИЦ КИ ПИЯФ на базе реактора ПИК применительно к детекторам нейтронов, несомненно, существенны, а именно:

- детекторы на базе ^3He имеют общепризнанный уникальный комплекс рабочих характеристик;

- в России ^3He доступен, а его цена в несколько раз ниже европейской. Поэтому детекторы нейтронов на базе ^3He — это наше конкурентное преимущество перед Европой, что, несомненно, надо максимально использовать.

3. АНАЛИЗ ПЛАНИРУЕМОГО ПРИБОРНОГО ПАРКА РЕАКТОРА ПИК И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОСНАЩЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЕТЕКТОРАМИ НЕЙТРОНОВ

Анализ приборного парка реактора ПИК с точки зрения обеспечения требуемых рабочих параметров детекторов нейтронов был осуществлен на основании анализа приборного парка детекторов и стратегических тенденций их развития как в ведущих мировых центрах нейтронных исследований, так и в аналогичных центрах России.

В сводной табл.3 представлены детекторы, которые предполагается использовать на экспериментальных установках реактора ПИК [2, 15–17]. Требования к загрузочной способности детекторов с ^3He -конвертером приведены в табл. 4. Загрузочные способности детекторов тесно увязаны с их конструкцией и технологией изготовления. Уровень фона и чувствительность к γ -фону приведены для максимальной загрузочной способности (фоновый счет $\geq 10^6$) и предельно низкой чувствительности к γ -фону ($< 1 \cdot 10^{-7}$). Из табл.3 и 4 ясно видно, что первоочередные детекторные технологии, которые необходимо развивать в НИЦ КИ ПИЯФ, — это технологии на базе конвертера ^3He .

Наименования установок подробно рассмотрены в [2]. Для облегчения изложения мы эти названия здесь повторим: S — малоугловой

Таблица 3. Типы детекторов, предлагаемых к использованию на реакторе ПИК

Прибор/ детектор	Газовый конвертер нейтронов (^3He)		Твердотельные конвертеры нейтронов (^6Li и ^{10}B)	
	Пропорциональные счетчики и 2D-модули на базе LPSC-счетчиков	2D ПЧД	Сцинтилляторы	Твердотельные детекторы
Порошковые дифрактометры	3 (D1, D2, D3)	—	—	—
Кристаллические дифрактометры	—	3 (DC1, DC3, DC5)	3 (DC3, DC4, DC6)	—
Спектрометры неупругого рассеяния	2 (IN4)	1 (IN2)	3 (IN1, IN3, IN5)	—
Малоугловые установки	2 (S2, S3)	3 (S1, S4, S5)	—	—
Рефлектометры	4 (R1–R4)	4 (R1–R4) 2 (R2, R3)	—	—
Количество детекторов	11	13	6	—

Таблица 4. Детекторы, работающие в нейтронных полях различной интенсивности на реакторе ПИК (общее количество 30)

Интенсивность нейтронных полей, нейтрон/с	Экспериментальные установки	Количество детекторов, шт.	Детекторная технология
До $1 \cdot 10^5$	S1	1	2D ПЧД (^3He)
	D2, IN2, IN4 (2 шт.)	3	^3He пропорциональные счетчики и LPSC
	IN1, IN3	2	Сцинтилляторы
До $1 \cdot 10^6$	DC1–DC5, DC7, S3, S4, S5, R1, R2, R3, R4	12	2D ПЧД (^3He)
	D1, D3, S2, R1–R4	7	^3He пропорциональные счетчики и LPSC
	DC3, DC6, IN5	3	Сцинтилляторы
До $1 \cdot 10^7$	Монитор пучка (R2, R3)	2	2D ПЧД (^3He -технология)
	Нет названия	0	^3He пропорциональные счетчики и LPSC
	Нет названия	0	Сцинтилляторы

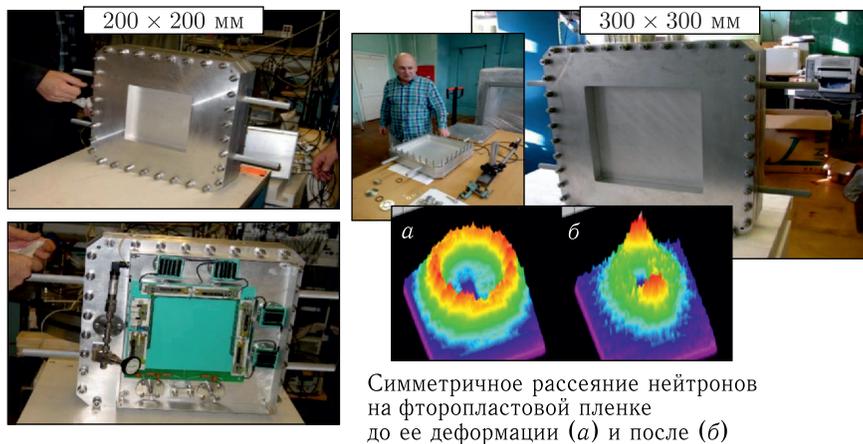
дифрактометр, D — порошковый дифрактометр, IN — трехосный спектрометр неупругого рассеяния, DC — кристаллический дифрактометр, R — рефлектометр, LPSC — линейный позиционно-чувствительный пропорциональный счетчик.

1. *Загрузка до $1 \cdot 10^5$ нейтрон/с.* НИЦ КИ ПИЯФ уже располагает технологиями, необходимыми для разработки и создания детекторов нейтронов с апертурой до 600×600 мм, удовлетворяющих требованиям современных физических экспериментов (рис. 2). Сегодня создание таких детекторов не требует существенного вложения средств в стадию разработки. На базе этих технологий могут создаваться ^3He -детекторы различных конструктивных модификаций, включая возможность их работы в вакууме.

2. *Загрузка до $1 \cdot 10^6$ нейтрон/с.* Для обеспечения работы существующих 2D ПЧД ^3He -детекторов в интенсивных нейтронных полях необходимо осуществить переход от метода съема информации на линию задержки на поканальный съем информации с катодных стрипов.

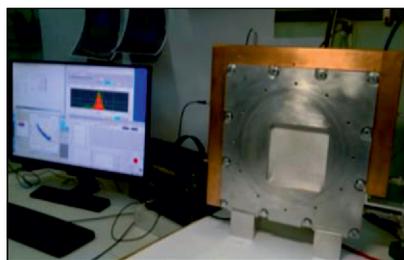
3. *Загрузка до $1 \cdot 10^7$ нейтрон/с и выше.* Если же по условиям эксперимента детектор должен работать в счетном режиме с эффективностью, близкой к 100%, то необходим детальный анализ целесообразности применения различных детекторных технологий (в частности, 2D LPSC, GEM-технологии, рад-структурные газоразрядные детекторы, сцинтилляционные детекторы и т. д.).

Мониторы нейтронных пучков имеют очень низкую апертуру ($\leq 100 \times 100$ мм) и эффективность (менее 1%), что позволяет им работать в пучках очень высокой интенсивности ($1 \cdot 10^8$ с $^{-1}$) и



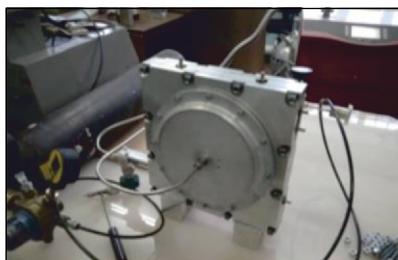
Симметричное рассеяние нейтронов на фторопластовой пленке до ее деформации (а) и после (б)

Рис. 2 (цветной в электронной версии). ПИЯФ располагает технологиями, необходимыми для разработки и создания двухкоординатных позиционно-чувствительных детекторов нейтронов с апертурой до 600×600 мм



Для пучков средней интенсивности $I < 1 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ (реактор ВВР-М)

- 1) Газовая смесь:
50 мбар ^3He + 950 мбар CF_4
- 2) Эффективность: 1% ($\lambda = 1,8 \text{ \AA}$)
- 3) $^3\text{He} + n \rightarrow p + T + 764 \text{ кэВ}$
 $\sigma = 5300 \text{ б}$ ($\lambda = 1,8 \text{ \AA}$)



Для высокоинтенсивных пучков $I = 1 \cdot (10^6 - 10^8) \text{ с}^{-1}$ (реактор ПИК)

- 1) Газовая смесь:
50 мбар N_2 + 950 мбар CF_4
- 2) Эффективность: 0,0002% ($\lambda = 1,8 \text{ \AA}$)
- 3) $^{14}\text{N} + n \rightarrow p + ^{14}\text{C} + 626 \text{ кэВ}$
 $\sigma = 1,9 \text{ б}$ ($\lambda = 1,8 \text{ \AA}$)

Рис. 3 (цветной в электронной версии). Мониторы имеют небольшую апертуру ($\geq 60 \times 60$ мм) и востребованы во всевозможных нейтронных экспериментах для измерения параметров пучка, как средство локализации пучка при юстировке оптических систем экспериментальных установок и измерения параметров пучка в режиме реального времени

плотности. Подобные прототипы нами разработаны [18], и некоторые из них представлены на рис. 3.

Для создания двухкоординатных детекторов частиц с апертурой 1000×1000 мм и более на базе дрейфовых трубок (LPSC) техноло-

гия в ПИЯФ уже разработана [19–21]. Она реализована отделом ОТД при создании спектрометра *заряженных частиц* PAS на 2000 каналов (рис. 4, а). Точность размещения трубок в пространстве ± 30 мкм, а точность детектирования заряженных частиц (протоны) составляет ≤ 200 мкм.

Отсюда следует вывод, что, хотя технология LPSC трубок уже есть, для регистрации нейтронов необходимо значительно повысить давление в трубках. Поэтому сделаны прототипы трубок с тонкими стенками (толщина 0,1 мм), которые выполнены из нержавеющей стали. Некоторые результаты приведены на рис. 4, б. В частности, давление газа



б) Дрейфовые трубки LPSC — нейтроны

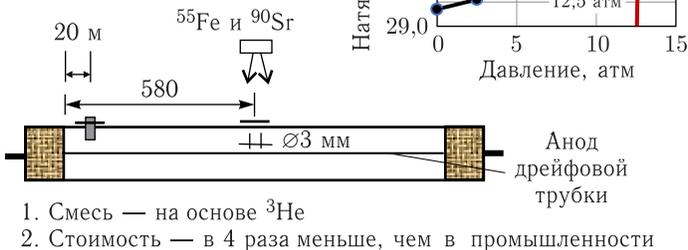


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Мы имеем *принципиально новую технологию*, которая является многоканальной, так как основана на дрейфовых трубках. Кроме того, она позволяет работать в вакууме, детектор содержит очень мало вещества за счет ультратонких стенок трубок (для протонов $X/X_0 \sim 0,05\%$ на трубку) и может детектировать как заряженные частицы, так и нейтроны

в этих трубках составляло до 12,5 атм. Пространственное разрешение в подобных LPSC трубках составляло: по одной координате — ± 5 мм (диаметр трубки) — оно определялось номером трубки, и по второй координате — ± 6 мм (вдоль анода) — оно определялось методом деления заряда (charge division) [22].

4. ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ НА РЕАКТОРЕ ПИК

Здесь описаны детекторы для двух крупных установок: 1) спектрометра по измерению времени жизни нейтрона методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) и 2) приборного комплекса по изучению бета-распада нейтрона. Руководителем создания этих комплексов является А. П. Серебров.

4.1. Детекторы УХН. Детекторы имеют различные размеры и предназначены для счета числа УХН в циклах измерений на спектрометре [23]. Свойства и особенности детекторов УХН приведены на рис. 5.

Каждый детектор представляет собой сборку из пропорциональных счетчиков с единым газовым объемом. Счетчики имеют форму параллелепипедов сечением 46×48 мм и длинами (по порядку слева направо): 1-й и 6-й — 160 мм, 2-й и 5-й — 250 мм, 3-й и 4-й — 284 мм. Пропорциональные счетчики объединены по три (по схеме $1 + 3 + 5$ и $2 + 4 + 6$) в два счетных независимых канала, что необходимо для увеличения надежности детектора и контроля работы каждого канала в отдельности.

Входное окно детектора имеет диаметр 290 мм (максимальный диаметр) и изготовлено из тонкой (~ 100 мкм) алюминиевой фольги для обеспечения минимальных потерь нейтронов. Детектор размещается на вакуумируемом нейтроноводе, а давление рабочего газа внутри детектора составляет 1 атм (абсолютное), поэтому для поддержки фольги со стороны вакуума установлена опорная решетка с ребрами жесткости.

Структура электрического поля внутри каждого пропорционального счетчика моделировалась и оптимизировалась следующим образом:

- мы отказались от наличия дрейфового промежутка с неоднородным электрическим полем со стороны входного окна, который был в предыдущем прототипе детектора;

- структура электрического поля в поперечном направлении каждого счетчика стала симметричной и сохранена практически постоянной в продольном направлении (вдоль анодной проволоочки).

В результате:

- все пропорциональные счетчики стали работать независимо друг от друга и иметь практически одинаковые рабочие характеристики;

- была достигнута высокая однородность величины коэффициента газового усиления вдоль анодных проволоочек: максимальные флуктуации величин КГУ не превышали $\leq 4\%$;

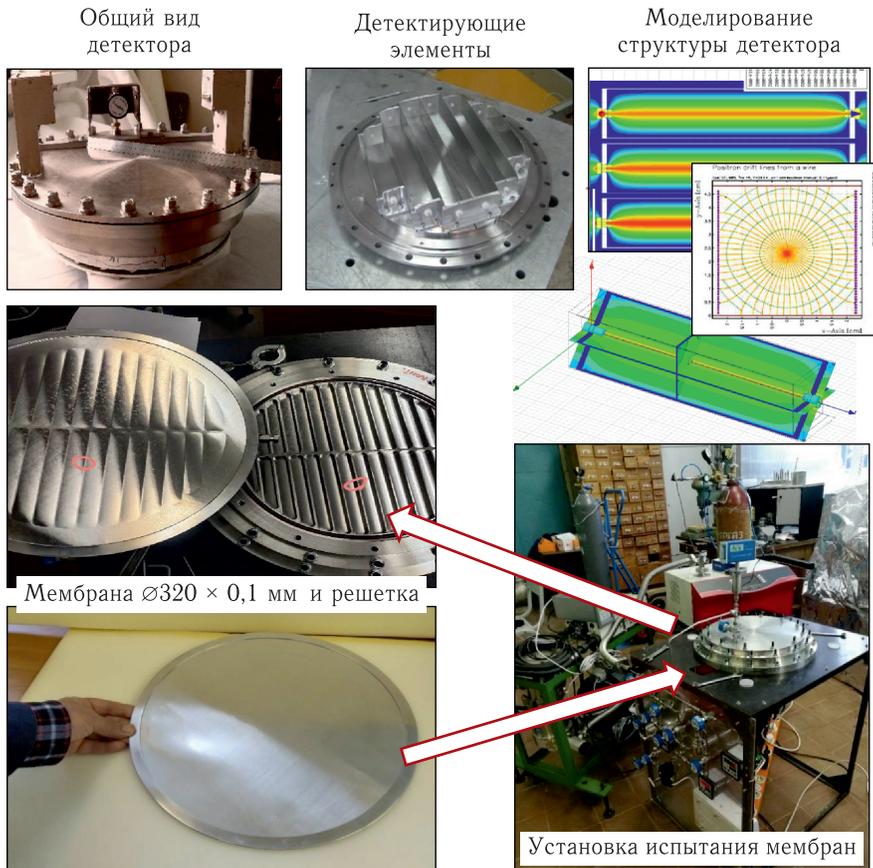


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Детекторы нейтронов на спектрометре по измерению времени жизни нейтрона методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН). На фоновом уровне $3,2 \cdot 10^{-9}$ мбар/л/с утечек через мембрану по ^4He не обнаружено

— было практически исключено перекрестное срабатывание соседних ячеек (счетчиков), вызванное попаданием в них частей протон-тритонных треков;

— максимальное время сбора ионов, образовавшихся в газовой лавине, было сокращено более чем в 8 раз и не превышает 10 мс. Это позволило минимизировать влияние пространственного заряда ионов на величину и структуру электрического поля детектора и, соответственно, увеличить интенсивность нейтронных пучков, с которыми детектор может работать без потери эффективности.

4.2. Бета-распад нейтрона. Схема установки, а также распределение заряженных и нейтральных частиц в ней дано на рис. 6 [24].

Энергия электронов находится в диапазоне 0–780 кэВ, а энергия протонов — 20–30 кэВ. Пространственное распределение этих частиц на входе и выходе в установку приведено также на рис. 6. Электроны регистрируются сцинтилляторами, которые имеют прямую форму и размеры 240×270 мм (вход) и 540×420 мм (выход). Протоны регистрируются сцинтилляторами, которые изогнуты по радиусу 115 мм (вход) и 150 мм (выход) и имеют размеры 460×200 мм (вход) и 640×320 мм (выход).

Длина волны нейтронов составляет $6,5 \pm 10\%$ Å. Все детекторы нейтронов размещены в конце установки *до* анализатора поляризации пучка и *после* него. Детекторы размещены парами, каждая из которых имеет:

- эффективность 5–0,01 % и эффективность 99,5 % при размерах 100×10 мм *до* анализатора;
- эффективность 5–0,01 % и эффективность 99,5 % при размерах 100×150 мм *после* анализатора.

Обеспечение эффективности детектора 5–0,01 % — это режим «монитора», принципиальных проблем не вызывает. Обеспечение эффективности детектора нейтронов на уровне 99,5 % — это серьезная проблема, но ее практическое решение выбрано нами по результатам моделирования.

5. НЕГАЗОВЫЕ КОНВЕРТЕРЫ

5.1. Результаты исследования прототипа детектора нейтронов с твердотельным конвертером $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Прототип детектора не с газовым, а с твердотельным конвертером $^{10}\text{B}_4\text{C}$ (один слой толщиной 300 мкм) создан и испытан в ОТД ПИЯФ (рис. 7). Он уверенно регистрирует нейтроны (источники ^{252}Cf и $\text{Pu}(\text{Be})$), гамма-кванты (источник ^{137}Cs), электроны (источник ^{90}Sr).

Получены:

- вольт-амперные и счетные зависимости. Изучено поведение камеры при варьировании напряжений на электродах;
- характерные амплитудные распределения, форма которых хорошо согласуется с литературными экспериментальными данными.

Детектор обладает рабочими параметрами, которые обеспечивают его устойчивую работу с запасом по напряжению.

Напыление ^{10}B на катод позволило обеспечить эффективность регистрации нейтронов на уровне около 3–5 % (теоретическая оценка) при работе с обычной газовой смесью без применения ^3He .

Пространственное разрешение детектора по нейтронам составляет менее ± 4 мм.

5.2. Сцинтилляционные детекторные технологии. Особо следует остановиться на необходимости развития сцинтилляционных детекторных технологий, которые пока еще недостаточно представлены в составе

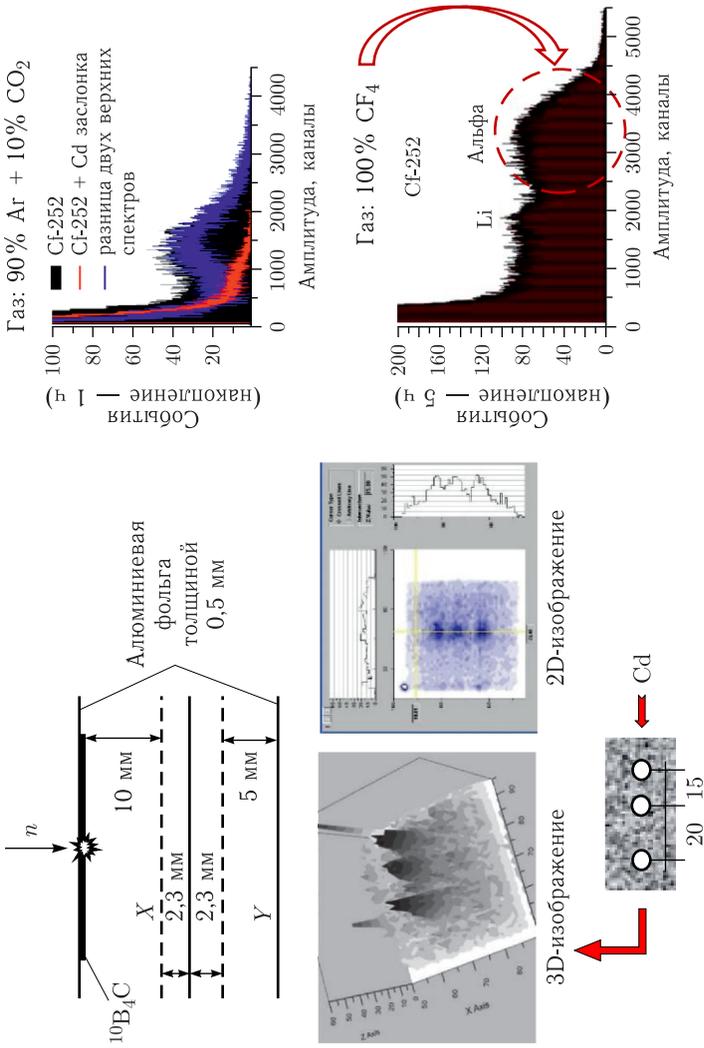


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Детектор нейтронов с газовым конвертером

экспериментальных установок реактора ПИК. Эти технологии активно развиваются в мире и имеют свою технологическую нишу:

— создание широкоапертурных детекторов сложной геометрической формы;

— мониторы нейтронных пучков;

— такие практические приложения, как нейтронная томография, требующая создания детекторов с высоким пространственным разрешением на уровне 0,1 мм (и лучше), и т. д.

Учитывая недостаточный технологический задел, который по этому направлению имеется в НИЦ КИ ПИЯФ, а также существенные финансовые вложения в будущем, необходимо объединить усилия и поддержать совместную работу уже складывающейся коллаборации НИЦ КИ ПИЯФ, ЛНФ ОИЯИ и ИЯИ РАН, направленную на практическое развитие сцинтилляционных технологий.

Отдельным направлением исследований, не представленным в перечне установок реактора ПИК, но получившим широкое развитие в последнее время на современных источниках, является *neutron imaging* в томографическом и радиографическом приложениях.

Наиболее продвинутые установки для нейтронографии и нейтронной томографии в Европе находятся на реакторе FRM-II на пучках холодных нейтронов и тепловых нейтронов, а также в PSI — холодные нейтроны и тепловые нейтроны. Аналогичные установки работают в NIST (США). На сегодня развитие данного направления представляется возможным только при освоении сцинтилляционных технологий.

6. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ В НИЦ КИ ПИЯФ ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОНОВ

6.1. Утечки и чистота газовой смеси. Утечки и чистота газовой смеси связаны. Поэтому их минимизация решалась в комплексе. В итоге скорость утечек для газовой смеси очень сократилась и не превышала 5 % в год даже для детектора с апертурой 600 × 600 мм. Для минимизации величины утечек была применена специальная схема герметизации всех элементов детектора на базе витонового шнура.

Чтобы осуществить эффективное обезгаживание всех материалов детектора, минимизация утечек осуществлялась в несколько этапов (рис. 8): все материалы отбирались с помощью масс-спектрометра (рис. 8, а); для электродов применялось только кварцевое стекло с напыленными на него ламельками; температура плавления припоя была высокая — около +280 °С (рис. 8, б); чистота газовой смеси проверялась специальным проточным счетчиком СНМ-50 (рис. 8, в).

6.2. Исследование радиационной стойкости детекторов нейтронов. Прогнозирование времени жизни детектора в условиях реального эксперимента на реакторе. Серьезной проблемой, связанной с временем жизни детектора в высокоинтенсивных нейтронных полях,

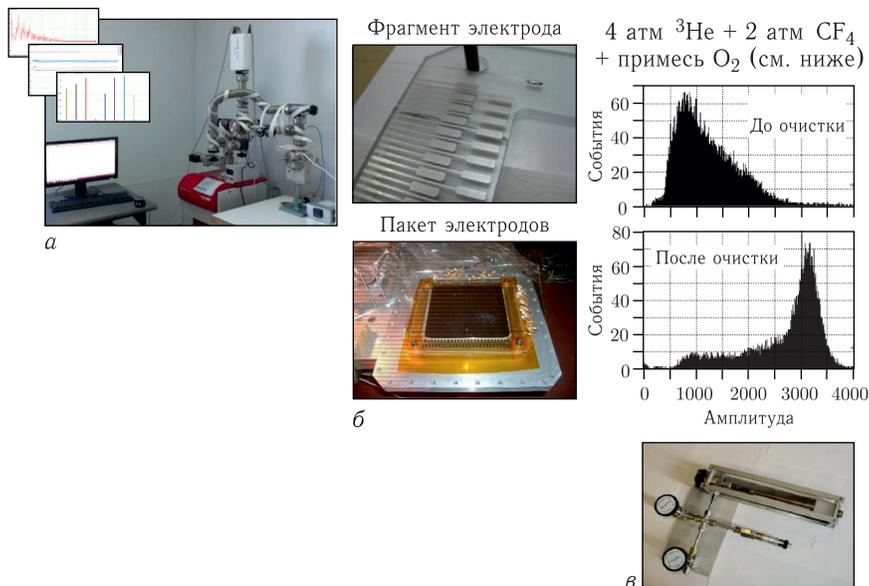


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Стабильность характеристик детектора (падение давления — менее 5% в год) обеспечивается минимальной утечкой рабочей смеси и минимальным газовыделением материалов детектора в его рабочий объем. а) Масс-спектрометр, через который должны пройти все материалы, которые могут быть использованы в конструкции детекторов нейтронов. б) Все электроды изготовлены из кварцевого стекла, структура для крепления проволочек — многослойное напыление, температура припоя 280 °С. в) Проверка чистоты газовой смеси на счетчике СММ-50

является проблема его радиационной стойкости и возможная деградация его рабочих характеристик. Интерес исследования механизмов старения состоит в анализе наиболее актуальных факторов, приводящих к развитию старения в данном детекторе. Учет этих факторов и их минимизация дают возможность значительного увеличения продолжительности жизни детектора в эксперименте.

В ПИЯФ (отдел ОТД) уже много лет ведутся исследования радиационной стойкости газоразрядных детекторов заряженных частиц на базе специализированного измерительного комплекса. Методы прогнозирования времени жизни детектора нейтронов в условиях реального эксперимента на реакторе находятся в стадии разработки. Разрабатывается методика его максимального увеличения (рис. 9).

При проведении экспериментальных исследований применяются наиболее эффективные современные неразрушающие методы контроля. В частности:

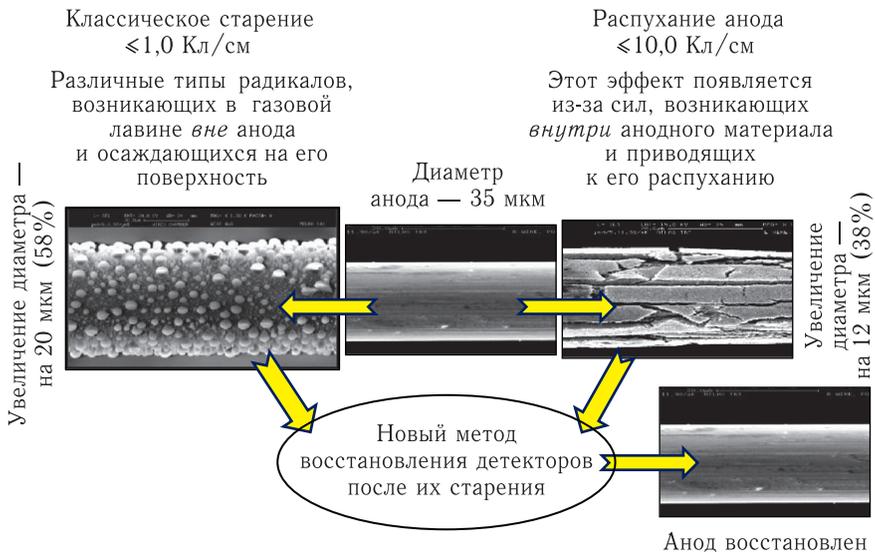


Рис. 9. Радиационная стойкость детекторов нейтронов

— для качественного анализа распределения осадков на поверхности электродов, а также их элементного состава — метод рентгенфлуоресцентной спектроскопии (ХЕМ) на сканирующем электронном микроскопе (SEM);

— для исследования количественного распределения элементного состава осадков как вдоль, так и в глубину электродов, применяемых в детекторе, — метод ядерных реакций на электростатическом ускорителе НИЦ КИ ПИЯФ (Ван де Грааф) [25, 26].

Разработаны и успешно испытаны методы восстановления газоразрядных детекторов, в которых старение вызвано двумя противоположными причинами [27, 28]:

— полимеризационными силами, создаваемыми «осадками» от газовых лавин *вне* анода;

— распуханием анодных проволочек из-за сил *внутри* анода.

Методы позволяют без разборки детектора восстановить его рабочие характеристики путем тренировки в газовом разряде. Изучение поверхности проволочек в восстановленных детекторах продемонстрировало надежность и эффективность метода.

Экспериментально обоснованы новые методы исследований, наиболее перспективным из которых является метод ядерных реакций, который оказался очень эффективным инструментом при исследовании механизмов развития процессов старения детекторов частиц.

7. ВЫВОДЫ

1. Анализ приборного парка реактора ПИК с точки зрения обеспечения требуемых рабочих параметров детекторов нейтронов был осуществлен на основании анализа приборного парка детекторов и стратегических тенденций их развития в ведущих мировых центрах нейтронных исследований, а также в аналогичных центрах России за более чем 60-летний период (40 лет (прошлое) + «современный» период (последние 10 лет) + около 10 лет (будущее)). Мировые тенденции по созданию новых детекторных технологий для нейтронов развиваются по нескольким основным направлениям:

- модернизация и развитие газовых детекторов на базе ^3He -конвертера нейтронов;
- развитие газовых детекторов на основе твердотельного конвертера ^{10}B ;
- развитие сцинтилляционных детекторов на основе спектросмещающих оптических волокон.

2. Несмотря на высокую стоимость ^3He , мировое нейтронное сообщество по-прежнему рассматривает газоразрядные ^3He -детекторы как базовое направление развития в первую очередь для детекторов *с апертурой до 1 м²*. Причиной этого является уникальное сочетание высокой эффективности регистрации нейтронов и низкой чувствительности к γ -фону.

Возможный переход на другие развиваемые сегодня в Европе детекторные технологии, имеющие в своей основе конвертеры нейтронов ^6Li и ^{10}B , в значительной степени носит вынужденный характер и имеет своей основной целью удешевить приборы, отказавшись от применения ^3He в детекторах большого и среднего объема *с апертурой от 1 до 80 м² и более*.

3. *Детекторные ^3He -технологии*, которые необходимы для обеспечения большинства экспериментальных установок реактора ПИК, в НИЦ КИ ПИЯФ существуют, либо имеется технологический задел для их развития и реализации. Апертура этих детекторов не превышает 1 м², и, следовательно, требуется небольшое количество ^3He (около 900 л). В России ^3He доступен, а его цена в несколько раз ниже европейской. Поэтому детекторы нейтронов на базе ^3He — это наше конкурентное преимущество перед Европой, что, несомненно, надо максимально использовать.

4. НИЦ КИ ПИЯФ уже располагает технологиями, необходимыми для разработки и создания детекторов нейтронов реактора ПИК с газовыми конвертерами на основе ^3He . К ним относятся:

- ПЧД детекторы *с апертурой до 600 × 600 мм*, удовлетворяющие требованиям современных физических экспериментов. Сегодня создание таких детекторов уже не требует существенного вложения средств в стадию разработки;

— многоканальные LPSC трубки длиной до 2,2 м и с 2D пространственным разрешением — не хуже ± 6 мм.

5. Негазовые технологии также развиваются в НИЦ КИ ПИЯФ:

— прототип для создания детекторов нейтронов реактора ПИК с твердотельным конвертером на основе $^{10}\text{B}_4\text{C}$;

— *сцинтилляционные детекторные технологии*. В НИЦ КИ ПИЯФ, ЛНФ ОИЯИ и ИЯИ РАН сформированы группы специалистов, профессионально занимающиеся сцинтилляционными детекторами и уже имеющие интересные наработки. Наибольший опыт в разработке широкоформатных сцинтилляционных детекторов на основе пластика $\text{ZnS}(\text{Ag})$ накоплен в ЛНФ ОИЯИ, где создано несколько детекторов, успешно действующих в некоторых российских научных центрах. Для успеха дальнейшей деятельности в этом направлении необходимы объединенные усилия по крайней мере научных центров в России, которые целесообразно начинать на базе разработок ЛНФ ОИЯИ.

6. В развитии техники нейтронных детекторов необходимо широко применять идеи и технологии, разработанные для детекторов заряженных частиц в физике высоких энергий (и иных областях исследований). Необходимо стремиться к унификации используемого оборудования и готовых технических решений. Для детекторных систем целесообразно разработать унифицированные детекторную электронику, а также электронику сбора и обработки данных. Необходимо стандартизовать интерфейсы и программное обеспечение нижнего уровня.

7. Большинство представленных материалов подробно обсуждены в МАГАТЭ в 2020 г. на техническом совещании и опубликованы в материалах совещания на английском языке

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ПИЯФ. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Благодарности. Выражаю огромную благодарность своим коллегам из ОИЯИ (Дубна) и НИЦ КИ ПИЯФ (ОФВЭ и ОНИ, Гатчина) за плодотворные обсуждения и помощь в подготовке публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Institute Laue-Langevin. <https://www.ill.eu/instruments-support/instruments-groups>.
2. *Крившич А. Г., Гаврилов Г. Е., Ильин Д. С., Косьяненко С. В., Куликов С. А.* Реакторный комплекс ПИК. Научное обоснование комплекса экспериментальных станций на реакторе ПИК. Гатчина, 2015. С. 164–196.
3. J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Center). <http://j-parc.jp/index-e.html>.

4. *Soyama K.* // Basic Energy Sciences Neutron & Photon Detector Workshop, Holiday Inn Gaithersburg, USA, 1–3 Aug., 2012.
5. *Peggs S. et al.* European Spallation Source Technical Design Report. ESS-2013-001.
6. *Peggs S. et al.* European Spallation Source Conceptual Design Report. ESS-2012-001.
7. *Kirstein O. et al.* Neutron Position Sensitive Detectors for the ESS // PoS (Vertex2014). 2014. V. 029; arXiv:1411.6194.
8. Forschungszentrum Jülich. http://www.fz-juelich.de/jcns/EN/Leistungen/InstrumentsNEW/_node.html.
9. *Yu B., Harder J. A., Mead J. A., Radeka V., Schaknovski N. A., Smith G. S.* Neutron Detector Development at Brookhaven // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 513. P. 362–366.
10. *Zeitelhack K.* Search for Alternative Techniques to Helium-3 Based Detectors for Neutron Scattering Applications // Neutron News. 2012. V. 23, Iss. 4. P. 10–13.
11. *Wilpert T.* Boron Trifluoride Detectors // Ibid. P. 14–19.
12. *Andersen K., Bigault T., Birch J., Buffet J. C., Correa J., Hall-Wilton R., Hultman L., Höglund C., Guerard B., Jensen J.* ¹⁰B Multi-Grid Proportional Gas Counters for Large Area Thermal Neutron Detectors // Ibid. P. 20–25.
13. *Rhodes N. J.* Scintillation Detectors // Ibid. P. 26–30.
14. International Collaboration on Neutron Detectors. <http://icnd.org>.
15. *Andreev V., Ganzha G., Ilyin D., Ivanov E., Kovalenko S., Krivshich A., Nadtochy A., Runov V.* Two-Dimensional Detector of Thermal Neutrons // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 581, No. 1–2. P. 123–127.
16. *Андреев В. А., Ганжа Г. А., Иванов Е. А., Ильин Д. С., Коваленко С. Н., Колхидашвили М. Р., Крившич А. Г., Надточий А. В., Рунов В. В., Соловей В. А., Шабанов Г. Д.* Газонаполненные позиционно-чувствительные детекторы тепловых нейтронов в ПИЯФ РАН // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, вып. 5. С. 964.
17. *Андреев В. А., Гвелесиани Т. А., Глушкова Т. И., Колхидашвили М. Р., Крившич А. Г., Леонова Е. Н., Майсузенко Д. А., Соловей В. А., Федорова О. П., Фетисов А. А.* Разработка двухкоординатного детектора тепловых нейтронов с входным окном 600 × 600 мм // ПТЭ. 2020. № 5. С. 16–22.
18. *Ильин Д. С., Колотушкин Д. С., Крившич А. Г., Надточий А. В., Швецова Н. Ю.* Разработка позиционно-чувствительного монитора тепловых нейтронов // Выпуск ИФТТ. 2015. № 10. С. 70–77.
19. *Андреев В. А., Гасанов М. И., Гасанов Д. М., Иванов В. Ю., Крившич А. Г., Майсузенко Д. А., Пчелинцева В. Д., Рабинский Л. Ш., Шабанов Г. Д.* Создание в ПИЯФ спектрометра протонов PAS для ФАИР (Германия). Изготовление для него координатных плоскостей тонкостенных алюминиевых трубок. Препринт ПИЯФ № 3052. Гатчина, 2021.
20. *Андреев В. А., Иванов В. Ю., Иванова М. М., Ившин К. А., Коченда Л. М., Кравцов П. А., Крившич А. Г., Майсузенко Д. А., Парченко И. Н., Трофимов В. А., Филимонова Н. Н., Шабанов Г. Д.* Вакуумная проверка дрейфовых трубок с ультратонкими стенками перед их сборкой в координатные плоскости Y1, X2, Y2 спектрометра протонов PAS. Препринт ПИЯФ № 3059. Гатчина, 2021.

21. *Крившич А. Г., Андреев В. А., Гасанов М. И., Гасанов Д. М., Иванов В. Ю., Иванов Е. А., Иванова М. М., Ильин Д. С., Майсузенко Д. А., Парченко И. Н., Фетисов А. А., Филимонова Н. Н., Шабанов Г. Д., Росси Д. М.* Исследование рабочих характеристик длинных дрейфовых трубок с ультратонкими стенками для спектрометра протонов PAS проекта FAIR (Германия). Препринт ПИЯФ № 3062. Гатчина, 2022.
22. *Andreev V., Gavrilov G., Krivshich A., Maleev V., Nadtochy A., Patrichev S., Volkov S.* Design Principles of the End Cap Drift Chambers in the L3 Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 430. P. 245–259.
23. *Андреев В. А., Васильев А. В., Иванов Е. А., Ильин Д. С., Крившич А. Г., Серебров А. П.* Детектор ультрахолодных нейтронов для спектрометра по измерению времени жизни нейтрона // ЖТФ. 2016. Т. 86, вып. 4. С. 130–138.
24. *Серебров А. П.* Измерение времени жизни нейтрона с использованием гравитационных ловушек ультрахолодных нейтронов // УФН. 2005. Т. 175, № 9. С. 905–924.
25. *Gavrilov G., Krivchitch A., Lebedev V.* Application of Nuclear Reaction Analysis for Aging Investigations of Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 515. P. 108–117.
26. *Krivchitch A. G., Lebedev V. M.* Application of Nuclear Reaction Analysis for the Fluorine Content Measurements under the Aging Investigations of Gas-Filled Particle Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 581. P. 167–170.
27. *Ferguson T., Gavrilov G., Egorov A., Krivchitch A., Kuznetsova E., Lebedev V., Shipunov L.* Anode Wire Swelling — a Possible Phenomenon in Anode Wire Aging under High Accumulated Dose // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 483. P. 698–712.
28. *Gavrilov G. E., Aksenov D. A., Conti R., Fetisov A. A., Krivchitch A. G., May-suzenko D. A., Shvecova N. Yu.* Using an 80%CF₄ + 20%CO₂ Gas Mixture to Recover Aged Anode Wires in Proportional Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 2012. V. 694. P. 167–172.