

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Б. П. КОНСТАНТИНОВА»**

УДК 539.1.074.825

На правах рукописи

Ильин Дмитрий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ
ДВУХКООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ
ДЛЯ УСТАНОВОК МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЙНИЯ**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

**Гатчина
2012**

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова».

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
А. Г. Крившич.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Л. В. Краснов,

доктор физико-математических наук,
профессор А. И. Огороков.

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.

Защита состоится «_____» _____ 2012 г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 002.115.01 в ФГБУ «ПИАФ»
по адресу: 188300, Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «ПИАФ».

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

И. А. Митропольский

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена разработке и созданию двухкоординатных (2D) детекторов тепловых нейтронов для дифрактометров малоуглового рассеяния «Вектор» и «Мембрана-2» на реакторе ВВР-М в ФГБУ «ПИЯФ» (далее – ПИЯФ).

Актуальность работы

Метод малоуглового рассеяния нейтронов (SANS¹) является эффективным дифракционным методом, который активно развивается и широко применяется в физике конденсированного состояния, молекулярной биологии, биофизике, при исследовании полимеров, в металлургии и других областях.

В ПИЯФ метод SANS представлен двумя дифрактометрами: «Вектор» [1] и «Мембрана-2» [2]. Ранее на обеих установках применялись однокоординатные (1D) детекторы, собранные из пропорциональных счетчиков СНМ-50 диаметром 12 мм [3], что вносило в рабочие характеристики установок ограничения принципиального характера: представление получаемой информации только в однокоординатном виде и низкое угловое разрешение.

Оснащение дифрактометров «Вектор» и «Мембрана-2» 2D-детекторами вызвано необходимостью развития и применения новых методов исследования, изучения новых классов объектов и решения экспериментальных задач на качественно новом уровне. В частности:

1) для изучения строения атомных кластеров (фуллеренов, нанотрубок и других структур с характерными размерами² $D \sim 1 \div 10$ нм) на дифрактометре «Мембрана-2» требовалось расширить диапазон переданных импульсов, измеряемых в пределах детектора³ для регистрации нейтронов не только в малоугловой области рассеяния ($\theta < 1^\circ$, масштабы структур $D \sim 10 \div 100$ нм), но и в области промежуточных углов ($1^\circ < \theta < 10^\circ$, $D \sim 1 \div 10$ нм) и больших углов ($\theta > 10^\circ$, $D \sim 1$ нм) в двухкоординатном режиме регистрации нейтронов.

2D-детектор с входным окном 200×200 мм² и пространственным разрешением $FWHM_{x,y} \leq 2$ мм позволяет проводить одновременные измерения в широком диапазоне переданных импульсов (до $q = 0,6 \text{ \AA}^{-1}$), исследовать образцы малого объема, например, на основе биологических макромолекул или редких, впервые синтезированных веществ, а также сканировать большие по площади образцы тонким пучком нейтронов. Компактность детек-

¹ SANS – Small-Angle Neutron Scattering.

² $D = 2\pi/q$, где $q = 4\pi \sin(\theta/2)/\lambda$ – переданный импульс, θ и λ – угол рассеяния и длина волны нейтрона.

³ Угловой захват 1D-детектора составляет всего $4,36^\circ$.

тора позволяет легко менять расстояние «образец – детектор» и тем самым выбирать необходимый диапазон углов рассеяния;

2) исследования физики магнитных явлений проводятся на дифрактометре «Вектор». Характеристики имеющегося 1D-детектора сдерживали возможность применения новых методов исследования магнитных свойств материи, например, метода измерения магнитно-ядерной интерференции [4], применяемого для изучения магнетизма наноматериалов немагнитных оксидов: CeO_2 , Al_2O_3 , ZnO и др. Развитие этого метода и области его применения на установке «Вектор» было связано с получением более детальной импульсной информации в области малых переданных импульсов $q < 0,005 \text{ \AA}^{-1}$, так как исследуемые корреляции имеют характерные масштабы $D \geq 100 \text{ нм}$.

2D-детектор, имеющий входное окно $300 \times 300 \text{ мм}^2$, пространственное разрешение $FWHM_{x,y} \leq 2 \text{ мм}$ и загрузочную способность не менее 100 кгц, позволит улучшить угловое разрешение детекторной системы в 5 раз и обеспечит регистрацию нейтронов без просчетов в необходимом диапазоне переданных импульсов.

Применение 2D-детекторов на установках «Вектор» и «Мембрана-2» придает им качественно новые экспериментальные возможности. Это обусловлено тем, что анизотропию рассеяния нейтронов, возникающую при различных условиях на исследуемом образце (температура, давление, освещение, магнитное поле и др.), возможно изучать только при использовании 2D-детекторов.

Цель и задачи работы

Основной целью работы являлось создание 2D-детекторов тепловых нейтронов для дифрактометров «Вектор» и «Мембрана-2», которые должны значительно расширить экспериментальные возможности метода SANS на этих установках. Для этого требовалось решить следующие задачи:

1. Разработать методы и технологические решения, позволяющие создавать 2D-детекторы тепловых нейтронов с предельно возможными параметрами путем оптимизации структуры электрического поля и геометрии MWPC⁴, состава и параметров газовой смеси, а также применения новых технологий изготовления детекторов, обеспечивающих долговременную чистоту рабочей газовой смеси.

2. На основании проведенных расчетов разработать и создать прототип 2D-детектора нейтронов на базе MWPC, провести исследования его рабочих характеристик и подтвердить полученными экспериментальными данными правильность примененных подходов.

3. Разработать и создать 2D-детекторы со следующими характеристиками:

⁴ MWPC – Multi-Wire Proportional Chamber.

- детектор для дифрактометра «Мембрана-2»: входное окно $200 \times 200 \text{ мм}^2$, эффективность регистрации нейтронов $\varepsilon \geq 70 \%$ ($\lambda = 3 \text{ \AA}$), пространственное разрешение $FWHM_{X,Y} \leq 2 \text{ мм}$, загрузочная способность до 100 кГц;

- детектор для дифрактометра «Вектор»: входное окно $300 \times 300 \text{ мм}^2$, эффективность регистрации нейтронов $\varepsilon \geq 70 \%$ ($\lambda = 9 \text{ \AA}$), пространственное разрешение $FWHM_{X,Y} \leq 2 \text{ мм}$, загрузочная способность до 100 кГц.

4. Провести комплекс исследований и измерений рабочих характеристик 2D-детекторов в составе дифрактометров «Вектор» и «Мембрана-2» на реакторе ВВР-М, выбрать оптимальные режимы работы детекторов на основании результатов экспериментов с реальными физическими образцами.

Научная новизна работы

1. Разработан и применен комплекс программ расчета рабочих характеристик детектора нейтронов, используя который можно разрабатывать газоразрядные детекторы нейтронов с индивидуальным набором характеристик и оптимизировать их. Полученные результаты оценок и расчетов хорошо согласуются с экспериментальными измерениями: для коэффициента газового усиления (КГУ) расхождение не превышает $20 \div 25 \%$, для эффективности регистрации нейтронов – 5% , а для пространственного разрешения – $10 \div 15 \%$.

2. Разработан и создан 2D-детектор тепловых нейтронов для дифрактометра «Вектор». Детектор позволил получать импульсную информацию в области импульсов $q < 0,005 \text{ \AA}^{-1}$ во всем диапазоне интенсивностей пучка. При этом угловое разрешение детекторной системы улучшено в 5 раз и составило $0,66 \times 10^{-3} \text{ рад}$, а апертура детектора увеличена на 20% и составила $\pm 2,93^\circ$ ($q_{\text{max}} = 0,036 \text{ \AA}^{-1}$, $\lambda = 9 \text{ \AA}$).

Характеристики новой детекторной системы позволили развить и применить новый эффективный и чувствительный метод исследования магнитной структуры вещества – метод магнитно-ядерной интерференции в малоугловом рассеянии поляризованных нейтронов, позволяющий исследовать слабые магнитные корреляции и изучать изменения магнитной амплитуды рассеяния на уровне $< 1 \%$.

3. Разработан и создан 2D-детектор тепловых нейтронов для дифрактометра «Мембрана-2». Достигнутое пространственное разрешение детектора $1,5 \times 2 \text{ мм}^2$ ($X \times Y$) позволило реализовать двухкоординатный режим регистрации с возможностью выбора диапазона переданных импульсов в широких пределах, от $q_{\text{max}} = 0,04 \text{ \AA}^{-1}$ (апертура $\theta = \pm 1^\circ$, $\lambda = 3 \text{ \AA}$) до $q_{\text{max}} = 0,6 \text{ \AA}^{-1}$ (апертура $\theta = \pm 16^\circ$, $\lambda = 3 \text{ \AA}$).

Новые возможности установки позволяют исследовать материалы с масштабами структур $D = 1 \div 100 \text{ нм}$, в том числе с анизотропными свойствами.

Научная и практическая ценность работы

1. Разработанные методы оптимизации и технологические подходы позволяют создавать различные газоразрядные детекторы тепловых нейтронов, стабильно работающие в широком диапазоне напряжений, имеющие большую чувствительную область, высокую эффективность регистрации, пространственное разрешение, низкий уровень собственного шума и предельно низкую γ -чувствительность.

2. На основе разработанной методики расчета и оптимизации рабочих характеристик газоразрядных детекторов тепловых нейтронов созданы 2D-детекторы с уникальным набором характеристик:

1) предельно высокое амплитудное разрешение $dE/E = 13 \div 20$ %, сравнимое с амплитудным разрешением пропорционального счетчика. Это позволило обеспечить эффективную дискриминацию внешнего γ -излучения (^{137}Cs) и (при необходимости) снизить γ -чувствительность детекторов более, чем в 1000 раз и довести ее до $\epsilon_\gamma \approx 1.8 \times 10^{-8}$ при незначительной потере эффективности регистрации нейтронов < 5 % (с 70 % до ≈ 65 %).

2) низкий уровень собственного шума $< 0,3$ Гц (на всю площадь детектора), что дает возможность измерения интенсивности нейтронов, рассеянных на слабо рассеивающих образцах.

3) высокое внутреннее разрешение – менее 0,6 мм, которое в несколько раз меньше размеров облака зарядов первичной ионизации – физического ограничения пространственного разрешения детектора;

4) стабильная работа в широком диапазоне рабочих напряжений: на аноде не менее 0,4 кВ, на дрейфовых электродах не менее 5 кВ;

5) грузочная способность на уровне 125 кГц (при 10 % просчетов) при минимальном возможном числе регистрирующих каналов электроники – пять каналов.

3. Разработана и применена уникальная технология изготовления электродов MWPC из кварцевого стекла, которая позволила минимизировать газовыделение материалов во внутренний газовый объем детекторов и обеспечить продолжительный ресурс работы. Приборы успешно работают с 2007-2008 гг.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на конференциях: The 11th Vienna Conference On Instrumentation, Vienna, Austria, February 19-24, 2007; 57-я Международная конференция «Ядро-2007. Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий», Воронеж, 25–29 июня 2007; 58-я Международная конференция «Ядро-2008. Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики», Москва, 23–27 июня 2008; XX Совещание по использованию рассеяния нейтронов

в исследованиях конденсированного состояния (РНИКС-2008), Гатчина, 13–19 октября 2008; 59-я Международная конференция «Ядро-2009. Фундаментальные проблемы и прикладные аспекты ядерной физики: от космоса до нанотехнологий», Чебоксары, 15–19 июня 2009; IV Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела. ФТТ-2009», Минск, 20–23 октября 2009; XXI Совещание по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния (РНИКС-2010), Москва, 16–19 ноября 2010.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 4 работы, в том числе в журналах Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Физика твердого тела, Известия РАН. Серия физическая, а также в материалах 6 конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа содержит 11 таблиц и 110 рисунков. Общий объем диссертации – 142 страницы.

2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении описывается основная цель работы и ее актуальность.

В первой главе приводится описание установок малоуглового рассеяния нейтронов «Вектор» и «Мембрана-2», их конструктивные особенности и характеристики, а также основные требования к новым детекторам и их конструкции.

Дифрактометр «Мембрана-2» является полномасштабной малоугловой установкой, предназначенной для исследования наноструктур, полимеров, биологических макромолекул и других объектов с характерными размерами от единиц до ста нанометров.

Существующий 1D-детектор на установке «Мембрана-2» представляет собой сборку из 41 пропорционального счетчика СНМ-50. Особенность установки заключается в том, что при большой базе «образец – детектор» $L_2 = 7,68$ м апертура 1D-детектора составляет всего $\theta = \pm 2,18^\circ$. Поэтому невозможно регистрировать нейтроны одновременно в большом телесном угле $\theta \leq \pm 10^\circ$, что необходимо для исследования структур масштаба $D \geq 1 \div 10$ нм (фуллерены, нанотрубки и др.).

Таким образом, основное требование к 2D-детектору и установке в целом заключалось в обеспечении эффективной регистрации нейтронов одновременно в большом телесном угле рассеяния $\theta \leq \pm 10^\circ$. Проведенные оценки показали, что указанные параметры могут быть достигнуты при

оснащении установки 2D-детектором с чувствительной областью не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ и пространственным разрешением $FWHM_{x,y} \leq 2 \text{ мм}$.

Диффрактометр «Вектор» предназначен для исследований спиновых корреляций и мезоскопических структур масштаба $D = 10 \div 100 \text{ нм}$, спиновой динамики при малых переданных импульсах с помощью поляризованных нейтронов теплового диапазона длин волн $\lambda = 7 \div 12 \text{ \AA}$.

1D-детектор на установке «Вектор» представляет собой сборку из 20 пропорциональных счетчиков СМ-50. При этом линейный размер чувствительной области детектора вдоль горизонтальной координаты составляет $\approx 280 \text{ мм}$.

Для возможности развития и применения перспективного метода исследования магнитных свойств материи на установке «Вектор» – исследования магнитно-ядерной интерференции поляризованными нейтронами – необходима информация о переданном импульсе в области очень малых переданных импульсов $q < 0,005 \text{ \AA}^{-1}$. Регистрация нейтронов должна осуществляться без использования гасителя прямого пучка с минимально возможным уровнем просчетов.

Для получения информации в указанной области импульсов требовалось улучшить угловое разрешение детекторной системы в 5 раз, а 2D-детектор должен иметь пространственное разрешение $FWHM_{x,y} \leq 2 \text{ мм}$. Конструкция и размещение установки в реакторном зале не позволяют существенно изменить базу «образец – детектор», поэтому чувствительная область 2D-детектора должна составлять не менее $300 \times 300 \text{ мм}^2$.

Для эффективного набора экспериментальных данных 2D-детекторы для обеих установок должны удовлетворять ряду требований:

- обеспечивать эффективность регистрации нейтронов $\epsilon \geq 70 \%$;
- обеспечивать грузочную способность не менее 100 кГц (интенсивность пучков на обеих установках не превышает $1 \times 10^5 \text{ н/с}$);
- для возможности исследования слаборассеивающих образцов иметь предельно низкую чувствительность к внешнему фону и низкий уровень собственного шума $< 0,5 \text{ Гц}$.

Из проведенного анализа различных типов детекторов нейтронов следует, что оптимальной конструкцией детектора, обеспечивающей требуемые характеристики, является MWPC с газовым конвертором нейтронов ^3He . Необходимая грузочная способность детекторов может быть реализована минимальным числом регистрирующих каналов электроники, что существенно с точки зрения стоимости детектирующей системы в целом.

Вторая глава посвящена разработке прототипа 2D-детектора нейтронов на базе MWPC и отработке всех технических решений, которые были положены в основу финальных детекторов. Для создания детектора потребовалось решить ряд вопросов, связанных с конструкцией газового объема,

геометрией MWPC, технологией изготовления, регистрирующей электроникой, а также с выбором и оптимизацией состава газовой смеси.

Прототип 2D-детектора должен был обеспечить следующие характеристики: пространственное разрешение $FWHM_{x,y} \leq 4$ мм, эффективность регистрации нейтронов $\varepsilon > 50$ % ($\lambda = 9$ Å).

Чувствительный элемент детектора нейтронов находится в замкнутом газовом объеме и состоит из двух функциональных частей (рис. 1): 1) MWPC, обеспечивающей газовое усиление первичного заряда и его локализацию; 2) двух дрейфовых промежутков, обеспечивающих требуемую эффективность регистрации нейтронов.

Эффективность детектора вычислялась по формуле (см. рис. 1, 2)

$$\varepsilon = \exp[-\mu_{BX} d_{BX}] \times \exp[-\mu_A d_A] \times (1 - \exp[-\mu_B d_B]), \quad (1)$$

где $\mu_x = n_x \sigma_x$ – линейный коэффициент поглощения нейтронов в веществе, n_x – концентрация атомов вещества, σ_x – полное сечение взаимодействия тепловых нейтронов, $d_{BX} = 10$ мм – толщина входного окна⁵.

Для выбора оптимального материала входного окна детектора, с точки зрения трансмиссионных⁶ свойств нейтронов, на установке «Вектор» на реакторе ВВР-М были проведены исследования конструкционных материалов. Из близких по своим механическим характеристикам алюминиевых сплавов (АМг5, В95, Д16) наиболее подходящим оказался сплав АМг5 (применен в конструкции). При толщине входного окна 10 мм суммарная трансмиссия нейтронов составила 12 %, из них < 3 % – нейтронов, рассеянных на входном окне.

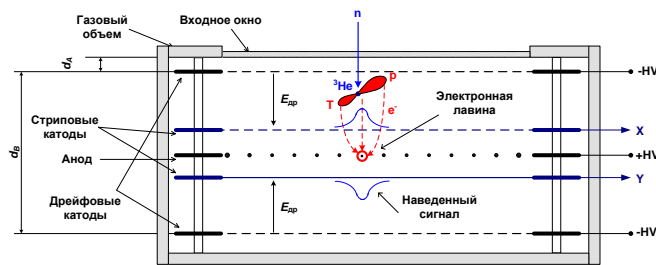


Рис. 1. Принципиальная схема 2D-детектора. Обозначения: $E_{др.}$ – направление силовых линий электрического поля в дрейфовых промежутках, $d_A = 4$ мм – зазор между входным окном и плоскостью дрейфового электрода, $d_B = 32$ мм – толщина чувствительной области детектора, +HV и –HV – потенциалы на аноде и дрейфовых электродах соответственно

⁵ Выбрана на основе модельных вычислений (ЦНИИ им. А. Н. Крылова) по параметру минимизации прогиба входного окна.

⁶ Рассеяние и поглощение нейтронов в образце.

Другим фактором неэффективности детектора являлся газовый зазор⁷ ($d_A = 4$ мм) между входным окном детектора и плоскостью переднего дрейфового электрода. В зазоре ослабление проходящего пучка нейтронов составило $\approx 30\%$.

Требуемая эффективность регистрации и долговременная ее стабильность обеспечиваются при давлении газа ${}^3\text{He}$ $P = 1,5$ атм. (рис. 2). По оценкам, при достигнутом уровне герметизации газового объема (утечки по ${}^3\text{He}$ 5 %/год) величина эффективности сохраняется на уровне 55-60 % в течение 7-8 лет эксплуатации.

Пространственное разрешение детектора ограничено пробегами продуктов ядерной реакции ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$, которые для чистого газа-конвертора составляют несколько сантиметров. Для уменьшения пробега частиц и достижения требуемого пространственного разрешения $FWHM_{X,Y} \leq 4$ мм в качестве второй газовой компоненты рабочей смеси использовался высокомолекулярный газ CF_4 . Этот газ локализует развитие электронной лавины в месте ее образования вблизи анодной проволоочки и обладает хорошими гасящими свойствами.

Из-за различных ионизационных потерь и начальных энергий частиц ($E_p = 573$ кэВ, $E_T = 191$ кэВ) центр тяжести заряда облака первичной ионизации смещен относительно точки ядерной реакции на величину $r = 0,35R_p$, где R_p – пробег протона. Поэтому пространственное разрешение детектора ограничено величиной $D_{sph} = 2r = 0,7R_p$ [5], которая определяется давлением газа CF_4 (рис. 3)

$$D_{sph} [\text{мм}] = 0,7 \times R_p [\text{мм}] \approx \frac{3 [\text{мм} \times \text{атм.}]}{P_{\text{CF}_4} [\text{атм.}]} \quad (2)$$

Для наполнения прототипа выбрано давление $P_{\text{CF}_4} = 1,5$ атм., при котором $D_{sph} = 2$ мм, что равно половине шага анода ($s = 4$ мм). Соответственно, пространственное разрешение составит $FWHM_{X,Y} \leq s = 4$ мм (см. ниже).

Особенности технологии изготовления. Работа газоразрядных детекторов нейтронов осуществляется в условиях замкнутого газового объема. При этом стабильная работа детектора в течение длительного времени достигается при условии сохранения чистоты рабочей газовой смеси.

В связи с этим было решено отказаться от стандартной технологии изготовления электродов MWPC из стеклотекстолита. Для минимизации газовыделения материалами детектора в рабочий объем была разработана технология изготовления электродов из кварцевого стекла. Электроды представляют собой стеклянные рамки с напыленными на их поверхность металлических lamелей для припаивания анодных или катодных проволочек. Достигнута требуемая высокая поверхностная адгезия металла: lamели

⁷ Газовый зазор необходим для предотвращения пробоя между дрейфовым электродом и входным окном детектора.

с размерами $2 \times 5 \text{ мм}^2$ выдерживали перпендикулярную нагрузку 0,5 кг даже после 10 циклов нагрева до 150°C , а пайку проволочек можно проводить многократно припоем с температурой плавления 280°C .

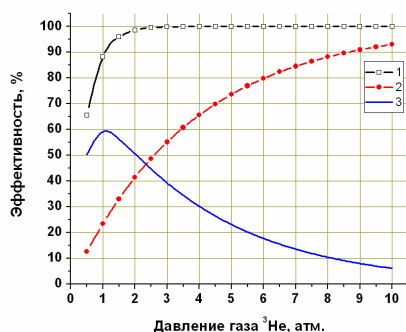


Рис. 2. Расчетная зависимость эффективности регистрации детектора нейтронов с длиной волны $\lambda = 9 \text{ \AA}$ от давления газа ^3He .

- 1 – чувствительный объем детектора без учета факторов неэффективности;
- 2 – ослабление потока нейтронов в газовом зазоре;
- 3 – результирующая эффективность детектора

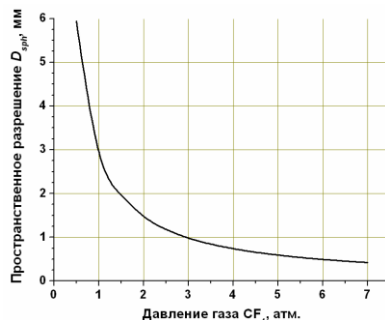


Рис. 3. График зависимости расчетного пространственного разрешения D_{sph} от давления газа CF_4 , построенный по данным вычислений пробега частиц в SRIM [6]

Новая технология позволила минимизировать выделение газовых примесей в рабочий объем детектора, а также тренировать детектор перед заполнением рабочим газом (нагревать до $100 \div 120^\circ \text{C}$ и откачивать до 10^{-7} мбар).

Геометрические параметры MWPC. Для обеспечения пространственного разрешения детектора $FWHM_{X,Y} \leq 4 \text{ мм}$ анодный электрод MWPC был изготовлен из золоченой вольфрамовой проволоочки диаметром 25 мкм с шагом $s = 4 \text{ мм}$. Симметрично относительно анодной плоскости на расстоянии $L_k = 4 \text{ мм}$ размещены катодные плоскости X и Y, состоящие из стрипов⁸. Стрипы плоскостей X и Y (ширина стрипа $w = 3 \text{ мм}$, расстояние между стрипами $d_{12} = 1 \text{ мм}$) ориентированы взаимно перпендикулярно для регистрации двух координат.

Геометрические параметры MWPC выбирались в соответствии с условием $(w + d_{12})/L_x \approx 1$, при котором одновременно обеспечивается высокая

⁸ Катодный стрип – это гальванически объединенные в группу по четыре проволоочки из нержавеющей стали диаметром 50 мкм.

амплитуда наведенного на катоды сигнала (Q_k) и минимальный уровень дифференциальной нелинейности [7-9].

Для съема сигналов применяется катодный метод съема информации на LC-линию задержки (ЛЗ), обеспечивающий высокую точность определения координаты, малое мертвое время, ограниченное длиной ЛЗ, $T < 1$ мкс и минимальное число регистрирующих каналов электроники.

Катодные стрипы подсоединены к ЛЗ (рис. 4), с концов которой сигналы поступают на зарядочувствительные предусилители. Они обеспечивают формирование логических импульсов с временной привязкой к входному сигналу, не зависящей от его амплитуды. По временной задержке между приходом сигналов на предусилители определяется координата электронной лавины

$$x = \left(1 - \frac{t_2 - t_1}{T}\right) \frac{l_x}{2}, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 – время прихода сигналов на концы ЛЗ, T – длина ЛЗ (в нс), l_x – длина чувствительной области катодной плоскости вдоль координаты X.

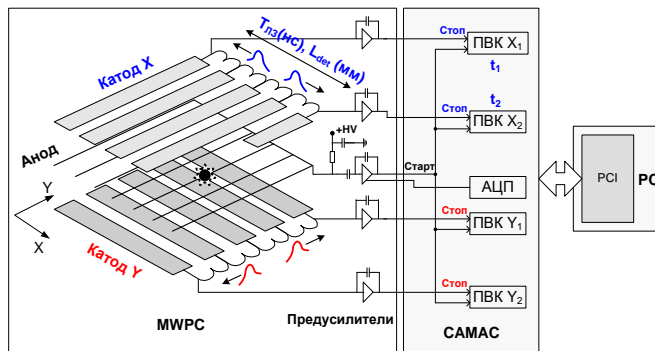


Рис. 4. Схема съема информации с 2D-детектора. Показаны подключенные к катодным стрипам ЛЗ с волновым сопротивлением $R_{ЛЗ} = 100$ Ом, предусилители с входным сопротивлением $R_{вх} = 100$ Ом, каналы преобразователя «время – код» (ПВК), аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и компьютер с интерфейсной PCI-картой. Дрейфовые электроды на рисунке не показаны

Особенность определения координат заключается в следующем:

- 1) координатный спектр вдоль оси X, перпендикулярной анодным проволочкам, имеет дискретный характер. Для того чтобы пространственное разрешение вдоль координаты X ($FWHM_x$) определялось шагом анода s и не превышало его, удовлетворялось условие $D_{sph} < s$;
- 2) координатный спектр вдоль оси Y, параллельной анодным проволочкам, имеет непрерывный характер. Пространственное разрешение вдоль

координаты Y ($FWHM_Y$) определяется величиной D_{sph} и внутренним разрешением детектора⁹ $FWHM_{вн.}$:

$$FWHM_Y = \sqrt{D_{sph}^2 + FWHM_{вн.}^2}. \quad (4)$$

Внутреннее разрешение детектора определяется конструкцией MWPC, параметрами ЛЗ и придетекторной электроники. При использовании метода съема сигналов на ЛЗ $FWHM_{вн.}$ ограничено уровнем шума, генерируемого в соединениях концов ЛЗ с предусилителями [10]

$$\frac{\Delta I}{I} = 2.46 \frac{1}{\Theta} \frac{e_n}{Z_0 Q_k} \sqrt{\tau} \quad [FWHM], \quad (5)$$

где $\Delta I/I$ – относительное внутреннее разрешение, $\Theta = T/\tau$ – фактор «качества» ЛЗ, T – длина ЛЗ (нс), τ – величина дисперсии сигнала, снимаемого с ЛЗ, e_n – спектральная плотность шума, приведенного ко входу предусилителя ($B/Гц^{1/2}$), Z_0 – волновое сопротивление ЛЗ, Q_k – заряд, наведенный на катоде.

Для достижения внутреннего разрешения $FWHM_{вн.} < 1$ мм, которое требуется для получения пространственного разрешения детектора $FWHM_Y \leq 4$ мм, волновое сопротивление линии задержки¹⁰ выбиралось как можно большим и составило $Z_0 = 100$ Ом. Для минимизации уровня шума электроники входное сопротивление катодных предусилителей $R_{вх.}$ согласовывалось с волновым сопротивлением ЛЗ: $R_{вх.} = Z_0 = 100$ Ом (режим «электронного охлаждения» [10]).

На основании расчетов в Garfield [11] для выбранной газовой смеси (1,5 атм. 3He + 1,5 атм. CF_4) и оптимизированной геометрии MWPC было показано, что внутреннее разрешение $FWHM_{вн.} < 1$ мм достигается при газовом усилении $M \geq 220$, что соответствует напряжению на аноде $HV_a = 2\ 600$ В и дрейфовых катодах $HV_{др.} = -2\ 500$ В. Напряжение $HV_{др.}$ выбрано так, что напряженность электрического поля в дрейфовом промежутке меньше напряженности поля в промежутке «анод – катод». Это позволяет избежать собирания первичных электронов из дрейфового промежутка на стриповых катодах при их дрейфе к аноду.

Во второй части главы приводятся результаты испытаний прототипа 2D-детектора в лаборатории на источнике нейтронов ^{252}Cf и на установке «Вектор» (реактор ВВР-М).

Измеренное внутреннее разрешение составило $FWHM_{вн.} = 0,8 \div 1,0$ мм при напряжении $HV_a = 2\ 600 \div 2\ 700$ В и $HV_{др.} = -2\ 500$ В ($M = 270 \div 420$). В этом режиме обеспечивалось требуемое пространственное разрешение детектора $FWHM_{X,Y} \leq 4$ мм при регистрации нейтронов. Также показано,

⁹ Под внутренним разрешением детектора подразумевается пространственное разрешение системы «MWPC + ЛЗ + предусилители».

¹⁰ ЛЗ состоит из дискретных элементов РСА EP6700-13, имеющих временную задержку сигнала между отводами $\tau = 6 \pm 1$ нс и полосу пропускания $BW \approx 30$ МГц.

что в диапазоне напряжений на аноде $HV_a = 2\,450 \div 2\,850$ В среднее отклонение измеренного КГУ от вычисленного в Garfield не превышало 25%.

Для измерения *пространственного разрешения* детектор облучался узким пучком тепловых нейтронов в центральной части чувствительной области. Ширину пучка (d) поэтапно уменьшали от 4 до 0,5 мм. Поскольку линейные размеры облака первичной ионизации конечны и определяются давлением газа CF_4 , то, начиная с $d = 1,5$ мм, ширина проекции пучка ($FWHM$) вдоль координаты Y перестает зависеть от дальнейшего уменьшения d и становится постоянной (рис. 5). Минимальное значение ширины проекции пучка соответствует пространственному разрешению детектора и составило $FWHM_Y \approx 2,5$ мм. Эта величина хорошо согласуется с предварительной оценкой, где учитывается внутреннее разрешение детектора и расхождение пучка нейтронов.

Измерение *эффективности регистрации* нейтронов прототипа проводилось с помощью стандартного пропорционального счетчика СНМ-50, эффективность которого равна $\varepsilon = 97\%$ ($\lambda = 9 \text{ \AA}$) [12]. Измеренная эффективность регистрации тепловых нейтронов с длиной волны $\lambda = 9 \text{ \AA}$ составила $\varepsilon = 55\%$, что хорошо согласуется с расчетным значением (см. рис. 2).

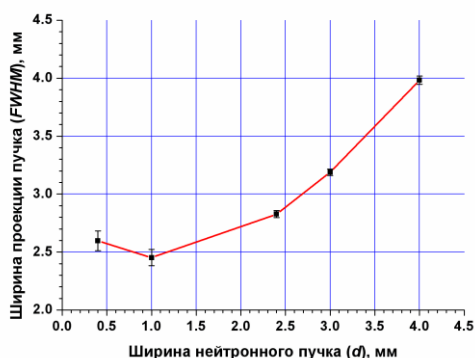


Рис. 5. Пространственное разрешение прототипа 2D-детектора вдоль непрерывной координаты Y , измеренное при напряжениях $HV_a = 2\,700$ В, $HV_{др.} = -2\,500$ В. Показана зависимость измеряемой ширины проекции пучка ($FWHM$) от ширины падающего пучка d

Форма *амплитудных спектров*, измеряемых на детекторе, определяется следующими факторами: чистота и состав газовой смеси, однородность КГУ вдоль чувствительной площади MWPC, приложенное напряжение на электродах. Результатом оптимизации указанных параметров явилось сходство амплитудных спектров, измеренных пропорциональным счетчиком (рис. 6А) и прототипом (рис. 6Б).

Амплитуды событий, обусловленных поглощением нейтронов, находятся в $800 \div 3500$ кан. АЦП (рис. 6Б). Полной энергии $E_{\text{полн.}} = 764$ кэВ, выделяемой в реакции ${}^3\text{He}(n,p)\text{T}$, соответствует пик в области 3200 кан. АЦП. Собственный шум детектора – события с амплитудами < 800 кан. АЦП (рис. 6В).

Достигнутое амплитудное разрешение на прототипе составило $\Delta E/E_{\text{полн.}} = 13 \div 20\%$ ($HV_a = 2500 \div 2700$ В, $HV_{\text{др.}} = -2500$ В) и позволило обеспечить режим регистрации, когда практически все регистрируемые события были обусловлены поглощением нейтронов, а собственный шум не превышал $< 0,2$ Гц на всю площадь детектора.

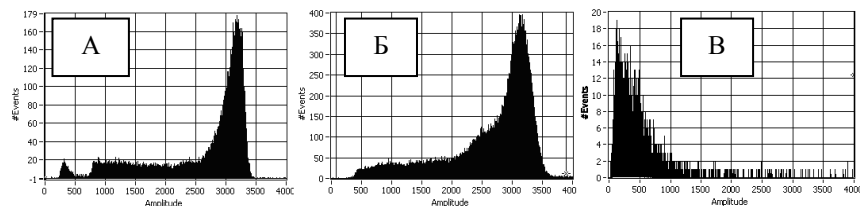


Рис. 6. Амплитудные спектры, измеренные на приборах (ось X – амплитуда сигнала в каналах АЦП, Y – число событий в канале). А) пропорциональный счетчик СММ-50, установка «Вектор», напряжение на аноде 2 000 В; Б) прототип 2D-детектора, установка «Вектор», $HV_a = 2\ 600$ В, $HV_{\text{др.}} = -2\ 500$ В; В) собственный шум прототипа 2D-детектора (порог дискриминатора занижен), $HV_a = 2\ 600$ В, $HV_{\text{др.}} = -2\ 500$ В

Таким образом, при разработке прототипа показана эффективность примененного подхода при выборе конструкции детектора, его рабочих параметров и достигнуты все требуемые характеристики.

В третьей главе проанализированы пути оптимизации конструкции прототипа 2D-детектора, необходимой для создания 2D-детекторов с требуемыми характеристиками для установок «Вектор» и «Мембрана-2».

В конструкции прототипа основным источником неэффективности регистрации являлся большой зазор между входным окном и первым катодом. Поэтому для достижения требуемой эффективности $\varepsilon \geq 70\%$ в экспериментальных образцах детекторов зазор был уменьшен до $d_A = 1,5$ мм. Для исключения возможности электрического пробоя газового промежутка между дрейфовым катодом и корпусом детектора, дрейфовый электрод был изготовлен из тонкого (2,5 мм) сплошного кварцевого стекла с металлическим напылением толщиной $15 \div 20$ мкм.

Детекторы предназначены для регистрации нейтронов с разными длинами волн, поэтому в детекторе для установки «Вектор» ($\lambda = 9$ Å) эффективность регистрации $\varepsilon \approx 70\%$ достигается при $P({}^3\text{He}) = 2$ атм., а в детекторе для установки «Мембрана-2» ($\lambda = 3$ Å) при $P({}^3\text{He}) = 4$ атм. (рис. 7).

Для сохранения требуемой эффективности регистрации давление газа ${}^3\text{He}$ выбрано на плато эффективности (указано стрелками на рис. 7). Такой

подход при достигнутом уровне герметизации (см. таблицу) обеспечил практически постоянное значение эффективности регистрации нейтронов для обоих детекторов в течение первых 5 лет эксплуатации.

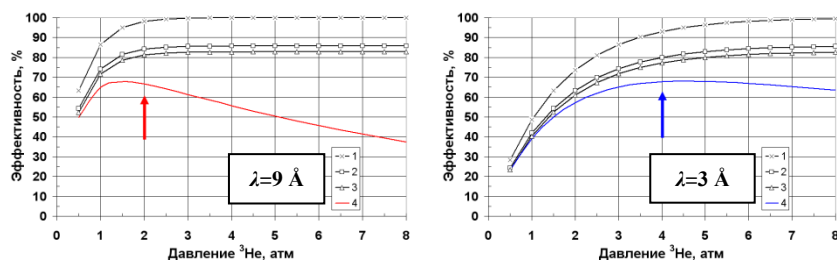


Рис. 7. Расчетные эффективности 2D-детекторов с входными окнами $300 \times 300 \text{ мм}^2$ для установки «Вектор» (слева) и $200 \times 200 \text{ мм}^2$ для установки «Мембрана-2» (справа).

- (1) – эффективность конверсии нейтронов чувствительным объемом детектора (30 мм) без учета факторов ослабления пучка;
- (2) – это (1) с учетом потерь нейтронов во входном окне;
- (3) – это (2) с учетом потерь нейтронов в дрейфовом катоде;
- (4) – это (3) с учетом потерь нейтронов в газовом зазоре – итоговая эффективность

Для обеспечения требуемого пространственного разрешения на уровне $FWHM_{X,Y} \leq 2 \text{ мм}$ для обоих детекторов

- 1) выбрано давление газа CF_4 $P = 2 \text{ атм.}$, при котором расчетное пространственное разрешение составило $D_{sph} = 1,48 \text{ мм}$ (рис. 3);
- 2) выбран шаг анода $s = 2 \text{ мм}$;
- 3) оптимизированы геометрические параметры MWPC: ширина стрипа $w = 2 \text{ мм}$, зазор «анод – катод» $L_x = 3 \text{ мм}$;
- 4) для достижения требуемого газового усиления и предотвращения возникновения эффекта электростатического расталкивания проволочек выбран диаметр анодных проволочек $d_a = 15 \text{ мкм}$;
- 5) разработаны малошумящие предусилители (средний квадратичный шум $7 \div 8 \times 10^3 \text{ э}$), которые позволили достигнуть внутреннего разрешения $FWHM_{\text{вн.}} = 0,6 \text{ мм}$ при газовом усилении $M = 250$.

Для эффективной регистрации нейтронов во всем диапазоне интенсивностей пучков ($< 1 \times 10^5 \text{ н/с}$) на установках «Вектор» и «Мембрана-2» разработан 4-канальный ПВК, который обеспечивал регистрацию событий со скоростью 125 кГц при уровне просчетов 10 %.

Во второй части главы приведены результаты испытаний детекторов на реакторе. Рабочие характеристики детекторов измерялись на соответствующих установках «Вектор» и «Мембрана-2» по методике, примененной для прототипа, и приведены в таблице.

При исследовании γ -чувствительности¹¹ детекторов показано, что амплитуды событий, обусловленных регистрацией γ -квантов, находятся преимущественно в низкоамплитудной части спектра в области собственных шумов детектора. Поэтому режекцией низкоамплитудных событий на обоих детекторах удается снизить γ -чувствительность до $\varepsilon_\gamma \approx 1,8 \times 10^{-8}$ и собственный шум до $< 0,3$ Гц одновременно. При этом потеря эффективности регистрации нейтронов для обоих детекторов составила < 5 %.

Таким образом, 2D-детекторы способны эффективно регистрировать тепловые нейтроны в условиях сильного γ -фона.

Таблица

Характеристики 2D-детекторов

Характеристика детектора	Детектор для установки «Мембрана-2»	Детектор для установки «Вектор»
Входное окно	$200 \times 200 \text{ мм}^2$	$300 \times 300 \text{ мм}^2$
Газовая смесь	4 атм. ^3He + 2 атм. CF_4	2 атм. ^3He + 2 атм. CF_4
Утечки газовой смеси	7 % в год	5 % в год
Эффективность регистрации нейтронов	70 % ($\lambda = 3 \text{ \AA}$)	72 % ($\lambda = 9 \text{ \AA}$)
Пространственное разрешение ($FWHM_{X,Y}$)	$1,6 \times 2,0 \text{ мм}^2$	$1,5 \times 2,0 \text{ мм}^2$
Диапазон рабочих напряжений	$HV_a = 3,0 \div 3,4 \text{ кВ}$ $HV_{др.} = -(1,0 \div 6,0) \text{ кВ}$	$HV_a = 2,9 \div 3,3 \text{ кВ}$ $HV_{др.} = -(1,0 \div 6,0) \text{ кВ}$
Собственный шум детектора	$< 0,2 \text{ Гц}$	$< 0,3 \text{ Гц}$
Загрузочная способность при 10 % просчетов	125 кГц	125 кГц
γ -чувствительность	$< 2 \times 10^{-8}$	$< 2 \times 10^{-8}$

В четвертой главе обсуждаются вопросы, связанные с использованием новых 2D-детекторов на экспериментальных установках «Вектор» и «Мембрана-2».

Для уменьшения регистрируемого фона реактора и возможности исследования слаборассеивающих образцов на дифрактометре «Вектор» была изготовлена защита детектора $300 \times 300 \text{ мм}^2$ из борированного полиэтилена. В результате чувствительность детектора к непучковым нейтронам уменьшилась в 300 раз. Существенно отметить, что собственный шум детектора с защитой составил всего 3 % от регистрируемого фона реактора. Таким образом, при необходимости дополнительная защита детектора может снизить уровень регистрируемого реакторного фона еще на порядок.

¹¹ Применялся γ -источник ^{137}Cs ($A = 8 \times 10^7$ Бк, $E_\gamma = 0,662$ МэВ).

Тестовые измерения на порошке Al_2O_3 показали, что характеристики новой детекторной системы позволили на установке «Вектор» увеличить диапазон переданных импульсов q одновременно в обе стороны (рис. 8):

- максимальный переданный импульс, измеряемый в пределах детектора, увеличен на 30 % и составил $q_{\text{max}} = 0,036 \text{ \AA}^{-1}$;
- угловое разрешение детекторной системы вдоль горизонтальной оси пучка улучшено приблизительно в 5 раз и составило $\Delta\theta = 0,66 \times 10^{-3} \text{ рад}$.

Пространственное разрешение и грузочная способность детектора обеспечили возможность получения на установке «Вектор» детальной информации в области малых переданных импульсов $q < 0,005 \text{ \AA}^{-1}$ без просчетов и без использования гасителя прямого пучка.

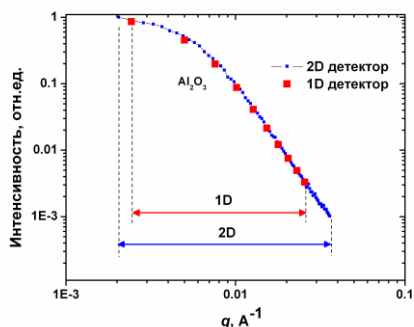


Рис. 8. Зависимость интенсивности рассеяния от переданного импульса для порошка Al_2O_3 , измеренная на 2D-детекторе $300 \times 300 \text{ мм}^2$ и 1D-детекторе. Оба детектора находятся в центральном положении относительно пучка на установке «Вектор»

Результаты экспериментов на образце CuZn с примесью Ni (1 ат. %) показали, что с помощью 2D-детектора можно изучать изменения магнитной амплитуды рассеяния на уровне $< 1 \%$. Таким образом, продемонстрирована перспективность использования нового детектора для развития и применения новых методов исследования магнитной структуры вещества.

Новый 2D-детектор с входным окном $200 \times 200 \text{ мм}^2$ был успешно испытан на установке «Мембрана-2» и показал свою перспективность для исследований как в области малых углов на образцах силоксана ($\text{Si} + \text{C}_{60}$), пористого стекла (Vycor) $D \sim 27 \text{ нм}$ [13], так и в области больших углов на образце фторопласта (PTFE).

В частности, возможность изучения объектов со структурами масштаба $D \sim 1 \text{ нм}$ (в том числе с анизотропными свойствами) продемонстрирована на фторопласте с размером структуры $D = 0,565 \text{ нм}$ [14]. Характерный пик интенсивности рассеяния нейтронов (рис. 9) соответствует области больших углов $\theta \sim 30^\circ$, прежде недоступной для измерений на установке.

Таким образом, решена главная задача модернизации детекторной системы установки «Мембрана-2» – обеспечено эффективное измерение рассеяния для структур с размерами $D = 1 \div 100$ нм в двухкоординатном режиме регистрации нейтронов, при этом максимальный переданный импульс q_{\max} может быть увеличен до $7 \div 8$ раз по сравнению с 1D-детектором ($q_{\max} = 0,08 \text{ \AA}^{-1}$).

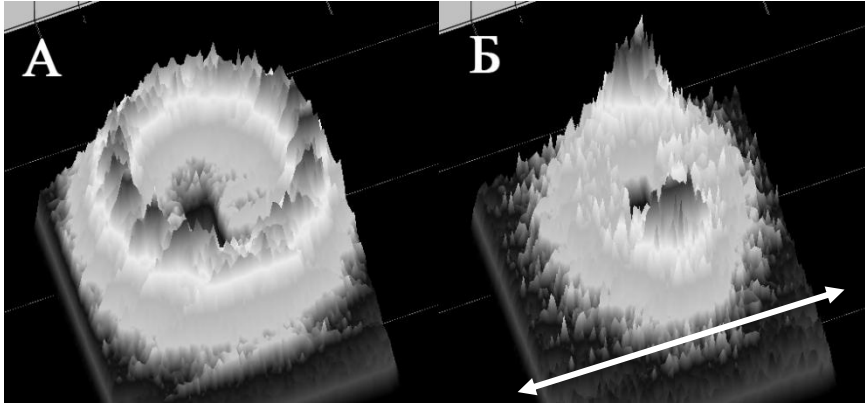


Рис. 9. Трехмерные координатные спектры рассеяния нейтронов ($\lambda = 3 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda/\lambda = 0,3$) на образце фторопласта (CF_2)_n, измеренные на установке «Мембрана-2». Угол рассеяния $\theta \approx 32^\circ$. Расстояние «образец – детектор» $L_2 = 100$ мм, на детекторе установлен поглотитель прямого пучка. А) исходный образец; Б) образец вытянут в указанном направлении

В выводах приведены основные результаты работы.

1. Разработан и построен для дифрактометра «Вектор» 2D-детектор тепловых нейтронов. Достигнутые характеристики детектора позволили существенно улучшить параметры установки: угловое разрешение детекторной системы улучшено в 5 раз и составило $\Delta\theta = 0,66 \times 10^{-3}$ рад, максимальный переданный импульс увеличен на 30 % и составил $q_{\max} = 0,036 \text{ \AA}^{-1}$, обеспечена возможность измерений в области малых $q < 0,005 \text{ \AA}^{-1}$, двухкоординатный режим регистрации нейтронов во всем диапазоне интенсивностей пучка.

2. Разработан и построен для дифрактометра «Мембрана-2» 2D-детектор тепловых нейтронов, который позволил измерять рассеяние нейтронов структурами масштаба $D = 1 \div 100$ нм в двухкоординатном режиме во всем диапазоне интенсивностей пучка. При этом максимальный переданный импульс q_{\max} , измеряемый 2D-детектором, может быть увеличен до $7 \div 8$ раз по сравнению с 1D-детектором ($q_{\max} = 0,08 \text{ \AA}^{-1}$).

3. Разработан и применен комплекс программ расчета и оптимизации параметров конструкции детектора нейтронов. Полученные результаты

оценок и расчетов, проведенные в программных пакетах SRIM и Garfield, хорошо согласуются с экспериментальными измерениями: для коэффициента газового усиления расхождение не превышает 20÷25 %, для эффективности регистрации нейтронов – 5 %, а для пространственного разрешения – 10÷15 %.

4. Разработана и применена новая технология изготовления электродов из кварцевого стекла, которая позволила минимизировать газовыделение материалами детекторов в их рабочий газовый объем и обеспечила большой ресурс работы. Детекторы уже проработали 5 лет без необходимости замены рабочего газа.

5. На обоих детекторах обеспечена возможность эффективного подавления внешнего γ -излучения до чувствительности $\varepsilon_{\gamma} < 2 \times 10^{-8}$ (^{137}Cs) и низкий уровень собственных шумов $< 0,3$ Гц при незначительной потере эффективности регистрации нейтронов < 5 %. Это позволяет эффективно регистрировать рассеяние нейтронов в условиях сильного γ -фона.

6. В настоящее время оба 2D-детектора включены в состав экспериментальных установок. Продемонстрировано принципиальное преимущество использования новых 2D-детекторов и их перспективность для дальнейшего развития метода малоуглового рассеяния.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Andreev V., Ganzha G., Ilyin D., Ivanov E., Kovalenko S., Krivshich A., Nadtochy A., Runov V.* Two-dimensional Detector of Thermal Neutrons // Nucl. Instrum. and Methods A. 2007. V. 581. P. 123–127.
2. *Андреев В. А., Иванов Е. А., Ильин Д. С., Коваленко С. Н., Крившич А. Г., Надточий А. В., Рунов В. В.* Двухкоординатный детектор тепловых нейтронов // Изв. РАН. Серия физическая. 2008. Т. 77. С. 1065–1069.
3. *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 // ФТТ. 2010. Т. 52. С. 964–968.
4. *Андреев В. А., Ганжа Г. А., Иванов Е. А., Ильин Д. С., Коваленко С. Н., Крившич А. Г., Надточий А. В., Рунов В. В.* Препринт ПИЯФ–2780. Гатчина, 2008, 24 с.
5. *Andreev V.A., Ilyin D.S., Ivanov E.A., Kovalenko S.N., Krivshich A.G., Nadtochy A.V.* Two-dimensional thermal neutron detector // Book of abstracts of LVII International Conference on Nuclear Physics «Nucleus 2007». 2007. P. 314.
6. *Андреев В.А., Иванов Е.А., Ильин Д.С., Коваленко С.Н., Крившич А.Г., Надточий А.В., Рунов В.В., Шабанов Г.Д.* Позиционно-чувствительные детекторы для экспериментов по дифракции тепловых нейтронов //

- Сборник тезисов 58-ой Международной конференции «Ядро-2008». 2008. С. 268.
7. Андреев В.А., Иванов Е.А., Ильин Д.С., Коваленко С.Н., Колхидашвили М.Р., Кривишч А.Г., Надточий А.В., Рунов В.В., Соловей В.А. Позиционно-чувствительные детекторы нейтронов для малоугловых дифрактометров в ПИЯФ РАН // Сборник тезисов XX Совещания по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния «РНИКС-2008». 2008. С. 145-146.
 8. Андреев В.А., Ганжа Г.А., Иванов Е.А., Ильин Д.С., Коваленко С.Н., Колхидашвили М.Р., Кривишч А.Г., Надточий А.В., Рунов В.В., Соловей В.А., Шабанов Г.Д. Разработка и создание двухкоординатных детекторов тепловых нейтронов в ПИЯФ РАН // Сборник тезисов 59-го международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2009». 2009. С. 275.
 9. Андреев В.А., Ганжа Г.А., Иванов Е.А., Ильин Д.С., Коваленко С.Н., Колхидашвили М.Р., Кривишч А.Г., Надточий А.В., Рунов В.В., Соловей В.А., Шабанов Г.Д. Двухкоординатные детекторы тепловых нейтронов для установок малоуглового рассеяния // Сборник докладов IV Международной научной конференции «ФТТ-2009». 2009. Т.3. С. 394-396.
 10. Андреев В.А., Ганжа Г.А., Иванов Е.А., Ильин Д.С., Коваленко С.Н., Колхидашвили М.Р., Кривишч А.Г., Надточий А.В., Рунов В.В., Соловей В.А. Детекторы тепловых нейтронов для установок малоуглового рассеяния «Мембрана» и «Вектор» // Сборник тезисов XXI Совещания по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния «РНИКС-2010». 2010. С. 28.

Список цитируемых источников

- [1] Григорьев С. В. и др. Препринт ПИЯФ–2028, Гатчина, 1995, 24 с.
- [2] Agatalyan M. M. et al. Preprint PNPI RAS– 1599, 1990, 35 с.
- [3] Засадыч Ю. Б. и др. // ПТЭ. 1980. Т. 5. С. 245.
- [4] Gordeyev G. et al. // Physica B. 1997. V. 234–236. P. 837–838.
- [5] Boie R. A. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. 1982. V. 200. P. 533–545.
- [6] Biersack J. P. et al. SRIM. <http://www.srim.org>.
- [7] Smith G. C. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. A. 1992. V. 323. P. 78–85.
- [8] Gatti E. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. A. 1979. V. 163. P. 83–92.
- [9] Smith G. C. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1988. V. 35. P. 409–413.
- [10] Radeka V. // Nucl. Sci. 1974. V. 21. P. 51–64.
- [11] Veenhof R. GARFIELD. <http://consult.cern.ch/writeup/garfield>.
- [12] Толченов Ю. М. и др. // ПТЭ. 1972. Т. 2. С. 47–48.
- [13] Wiltzius P. et al. // Phys. Rev. A. 1987. V. 36. P. 2991–2994.
- [14] Noirez L. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 243111.