

*На правах рукописи*

**Фомин Алексей Константинович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С НЕЙТРОНАМИ И НЕЙТРИНО  
В ЗАДАЧАХ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ НА РЕАКТОРАХ**

**01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук**

**Гатчина – 2019**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

**Научный консультант:**

**Серебров Анатолий Павлович**, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», лаборатория физики нейтрона, главный научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

**Иванов Вадим Константинович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кафедра экспериментальной физики, профессор;

**Негодаев Михаил Александрович**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, лаборатория электронов высоких энергий, главный научный сотрудник;

**Синёв Валерий Витальевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, лаборатория гамма-астрономии и реакторных нейтрино, ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова».

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_ часов

на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html#fom>

Автореферат разослан \_\_\_\_\_

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

С. В. Демидов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Диссертация посвящена вопросам моделирования нейтронных и нейтринных экспериментов на реакторах. Постановка новых прецизионных экспериментов требует создания математических моделей этих экспериментов и проведения соответствующих расчетов на высоком уровне точности. В работе разработаны методы и подходы для создания моделей экспериментальных установок, которые затем использовались при проектировании и проведении измерений.

Основная часть диссертации посвящена исследованиям с ультрахолодными нейтронами (УХН). Нейтроны очень низких энергий ( $\sim 10^{-7}$  эВ), которые принято называть ультрахолодными, обладают уникальным свойством – их можно хранить в материальных и магнитных ловушках. Это явление дает новые методические возможности для проведения прецизионных экспериментов и изучения фундаментальных вопросов физики.

Задача прецизионного измерения времени жизни нейтрона имеет большое значение для физики элементарных частиц и космологии. Распад свободного нейтрона на протон, электрон и антинейтрино определяется процессом слабого взаимодействия, переходом  $d$ -кварка в  $u$ -кварк. В Стандартной модели элементарных частиц смешивание кварков описывается с помощью матрицы Кабиббо – Кобаяши – Маскавы (ККМ), которая должна быть унитарной. Матричный элемент матрицы  $V_{ud}$  может быть определен из ядерного бета-распада и бета-распада нейтрона. Вычисление  $V_{ud}$  из данных по нейтронному бета-распаду является крайне привлекательным из-за простоты теоретического описания.

Прецизионные измерения времени жизни нейтрона оказываются также исключительно важными для проверки модели формирования Вселенной. Наблюдаемыми величинами в модели Большого взрыва являются

первоначальные распространенности дейтерия и гелия-4. Они зависят от отношения числа барионов к числу фотонов на стадии первичного нуклеосинтеза и времени жизни нейтрона. Таким образом, прецизионное измерение времени жизни нейтрона оказывает влияние на проверку модели нуклеосинтеза на ранней стадии формирования Вселенной.

Задача экспериментального поиска электрического дипольного момента является одной из самых важных в фундаментальной физике. Она имеет уже более чем 50-летнюю историю, причем последнее и значительное продвижение в этой проблеме связано с развитием методики ультрахолодных нейтронов. Важность задачи определяется тем, что она прямым образом связана с проблемой *CP*-нарушения. Элементарные частицы могут обладать электрическим дипольным моментом только в случае нарушения пространственной и временной симметрий.

Эксперимент по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций связан с нарушением барионного числа. Закон сохранения барионного числа является исключительно важным: он обеспечивает стабильность материи. Вместе с тем без нарушения этих двух законов – временной инвариантности и барионного числа – возникновение Вселенной невозможно. Постановка указанных выше экспериментов имеет целью прояснить вопросы о механизме возникновения Вселенной.

В диссертации также рассмотрен вопрос о создании новых источников УХН на реакторах ВВР-М и ПИК, так как именно высокая плотность УХН позволит достичь прорывных результатов в экспериментах.

В настоящее время в связи с обнаружением реакторной антинейтринной аномалии проблема стерильных нейтрино является весьма актуальной. Предполагается, что из-за перехода реакторных антинейтрино в стерильное состояние может наблюдаться эффект осцилляций на коротких расстояниях от реактора. Кроме того, стерильное нейтрино рассматривается как кандидат в

темную материю. Данная проблема связана с измерением времени жизни нейтрона, так как в эффективность нейтринных детекторов входит сечение реакции обратного бета-распада нейтрона. По результатам последних исследований произошло уменьшение измеренного времени жизни нейтрона, что внесло некоторый вклад в реакторную антинейтринную аномалию.

### **Цели и задачи диссертации**

Целью работы явилось обеспечение моделирования ряда существующих и планируемых экспериментов, входящих в программу исследований лаборатории физики нейтрона НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, а также других экспериментов, которые имеют непосредственное отношение к данным исследованиям. Для этого было необходимо решить следующие задачи, среди которых:

- 1) анализ мировых данных по измерению времени жизни нейтрона в связи с проблемой расхождения результатов экспериментов; получение нового среднемирового времени жизни нейтрона после внесения поправок и дополнений и рассмотрение вытекающих из этого следствий;
- 2) поиск возможных систематических погрешностей в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона МАМВО I с целью выяснения причин расхождения с экспериментом ПИЯФ с гравитационной ловушкой;
- 3) поиск возможных систематических погрешностей в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов с целью выяснения причин расхождения с экспериментом ПИЯФ с гравитационной ловушкой;
- 4) определение значений достижимой плотности УХН на создаваемых источниках на основе сверхтекучего гелия на реакторах ВВР-М и ПИК; сравнение их друг с другом и с мировым уровнем; определение плотности УХН в экспериментальных установках по измерению электрического

дипольного момента (ЭДМ) нейтрона и времени жизни нейтрона; оптимизация параметров источников;

- 5) создание компьютерной модели эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой; анализ эксперимента на всех его стадиях; получение систематических неопределенностей окончательного результата;
- 6) создание компьютерной модели эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона при помощи двухкамерного магнитно-резонансного спектрометра с длительным удержанием УХН; определение систематической неопределенности связанной с токами утечки;
- 7) разработка проекта эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с использованием УХН; определение чувствительности эксперимента на новом источнике УХН, создаваемом на реакторе ВВР-М; сравнение с мировым уровнем;
- 8) создание компьютерной модели детектора реакторных антинейтрино в эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино; проведение расчетов при проектировании модели и полномасштабного детектора; получение расчетного спектра и сравнение с экспериментом.

### **Научная новизна работы**

1. Получено новое среднемировое время жизни нейтрона  $880,0 \pm 0,9$  с, отличное от установившегося с 2001 года значения Particle Data Group (PDG)  $885,7 \pm 0,8$  с. С новым значением времени жизни нейтрона:
  - 1) устранено наметившееся разногласие со Стандартной моделью,
  - 2) наблюдается лучшее согласие с космологическими данными,
  - 3) обнаружено расхождение в результатах измерения времени жизни нейтрона между пучковым методом и методом хранения, 4) изменилась эффективность нейтринных детекторов, что внесло свой вклад в реакторную антинейтринную аномалию.

2. Впервые проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона МАМВО I с учетом эффекта квазиупругого рассеяния УХН на поверхности жидкого фомблина. Получена отрицательная поправка к результату, после введения которой устраняется разногласие с результатом эксперимента ПИЯФ с гравитационной ловушкой.
3. Впервые проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов. Получена отрицательная поправка к результату, после введения которой устраняется разногласие с результатом эксперимента ПИЯФ с гравитационной ловушкой.
4. Впервые получено расчетное значение плотности УХН на источниках, создаваемых на реакторах ВВР-М и ПИК. В эксперименте по поиску ЭДМ нейтрона на реакторе ВВР-М возможно достижение плотности  $1,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , что на два порядка величины превышает плотность на существующих источниках УХН.
5. Впервые проведено моделирование эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой УХН. Получен ряд систематических ошибок, который позволил заявить полученный результат с указанной точностью  $881,5 \pm 0,7_{\text{стат}} \pm 0,6_{\text{сист}} \text{ с}$ . Результат включен в PDG.
6. Впервые проведено моделирование эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона при помощи двухкамерного магниторезонансного спектрометра. Получен систематический эффект от токов утечки, который был учтен при получении результата эксперимента, который на уровне достоверности 90 % устанавливает верхний предел на величину ЭДМ нейтрона  $|d_n| < 5,5 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$ . Результат включен в PDG.
7. Впервые произведена разработка проекта эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с УХН. Получена чувствительность разрабатываемого эксперимента на новом источнике УХН, создаваемом на

реакторе ВВР-М. Существующая в мире чувствительность может быть превышена в 10–40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок.

8. Впервые проведено моделирование детектора реакторных антинейтрино в эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино. Получен расчетный спектр регистрируемых антинейтрино и произведено сравнение с экспериментом.

### **Практическая значимость**

Предложенные методы и подходы могут быть применены при разработке и моделировании экспериментов с УХН и антинейтрино, которые сейчас активно ведутся в России и за рубежом. С этой целью также могут быть использованы семь программ для ЭВМ, зарегистрированных автором диссертации. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых источников УХН.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. В 2010 году после внесения соответствующих поправок было получено среднемировое время жизни нейтрона  $880,0 \pm 0,9$  с, отличное от установившегося с 2001 года значения PDG  $885,7 \pm 0,8$  с. С новым значением времени жизни нейтрона: 1) устранено наметившееся разногласие со Стандартной моделью, 2) наблюдается лучшее согласие с космологическими данными, 3) обнаружено расхождение в результатах измерения времени жизни нейтрона между пучковым методом и методом хранения, 4) изменилась эффективность нейтринных детекторов, что внесло свой вклад в реакторную антинейтринную аномалию.
2. При помощи разработанной компьютерной модели проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона MAMBO I, включающий в себя эффект квазиупругого рассеяния УХН на поверхности жидкого фомблина, который был открыт после проведения эксперимента.



Получена поправка к экспериментальному результату, которая составляет  $-6,0 \pm 1,6$  с.

3. При помощи разработанной компьютерной модели проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов. За счет рассмотрения эффектов неполного вытекания из внутреннего объема во время чистки при работе с внешним объемом, нагрева нейтронов затворами и разной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных объемов хранения получена поправка к экспериментальному результату, которая составляет  $-5,5 \pm 2,4$  с.
4. Получены значения плотности УХН, достижимой на источниках, создаваемых на реакторах ВВР-М и ПИК. С этой целью разработана компьютерная модель источника УХН на основе сверхтекучего гелия. Полученная плотность УХН на реакторе ВВР-М на два порядка величины превышает плотность существующих в мире источников. В результате оптимизации параметров источника на реакторе ВВР-М получена расчетная плотность УХН в ловушке ЭДМ-спектрометра  $1,3 \cdot 10^4$  см<sup>-3</sup> и плотность в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона  $8,4 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup>, что позволит на порядок величины улучшить статистическую точность этих экспериментов. Расчетная плотность УХН на реакторе ПИК на порядок величины хуже, чем на реакторе ВВР-М.
5. Разработана компьютерная модель эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой. Результаты моделирования внесли свой вклад на всех этапах эксперимента – от конструирования установки до получения результата измерений. Получены систематические неопределенности, связанные с неопределенностью функции потерь (0,3 с), неточностью расчета эффективной частоты соударений (0,1 с), неточностью установки угла ловушки УХН (0,1 с).

Моделирование позволило заявить результат эксперимента с указанной точностью  $881,5 \pm 0,7_{\text{стат}} \pm 0,6_{\text{сист}}$  с.

6. Разработана компьютерная модель эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона при помощи двухкамерного магнитно-резонансного спектрометра с длительным удержанием УХН. Получен систематический эффект от токов утечки, который составляет  $< 10^{-26} e \cdot \text{см}$ . Данный эффект был учтен при получении результата эксперимента, который на уровне достоверности 90 % устанавливает верхний предел на величину ЭДМ нейтрона  $|d_n| < 5,5 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$ .
7. Разработан проект эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с использованием УХН. При помощи созданной компьютерной модели получена чувствительность эксперимента на новом источнике УХН, создаваемом на реакторе ВВР-М. Чувствительность существующего эксперимента Института им. Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ) может быть превышена в 10–40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок.
8. Разработана компьютерная модель детектора реакторных антинейтрино в эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино. Произведены все необходимые расчеты при проектировании установки. Полученный расчетный спектр сравнен с экспериментальным. Между расчетным и экспериментальным спектром наблюдается расхождение в области 3 МэВ.

### **Личный вклад автора**

Содержание диссертации и выносимые на защиту результаты отражают личный вклад автора в опубликованные работы. Автором произведена разработка программного обеспечения, планирование, подготовка и проведение моделирования, обработка, анализ, обобщение, публикация и представление результатов в виде статей и докладов, подготовленной диссертации. Автором зарегистрировано семь результатов интеллектуальной деятельности.

1. Программа для моделирования хранения ультрахолодных нейтронов в ловушке с учетом квазиупругого рассеяния на стенках: свид. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2018617809 / А. К. Фомин; зарег. 18.05.2018; опубл. 02.07.2018.
2. Программа для моделирования эксперимента с регистрацией ультрахолодных нейтронов, неупруго рассеянных при взаимодействии со стенками сосудов: свид. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2018618893 / А. К. Фомин; зарег. 04.06.2018; опубл. 23.07.2018.
3. Программа для моделирования источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия: свид. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2018660577 / А. К. Фомин; зарег. 07.08.2018; опубл. 24.08.2018.
4. Программа для моделирования эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с хранением ультрахолодных нейтронов в материальной ловушке: свид. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2018611711 / А. К. Фомин; зарег. 15.12.2017; опубл. 06.02.2018.
5. Программа для моделирования эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магниторезонансного спектрометра: свид. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2018615721 / А. К. Фомин; зарег. 22.03.2018; опубл. 15.05.2018.
6. Программа для моделирования эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с ультрахолодными нейтронами: свид. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2017662103 / А. К. Фомин; зарег. 01.09.2017; опубл. 27.10.2017.
7. Программа для моделирования детектора реакторных антинейтрино: свид. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2017662880 / А. К. Фомин; зарег. 28.09.2017; опубл. 20.11.2017.

## **Достоверность результатов исследования**

Достоверность результатов обосновывается сравнением расчетов с экспериментальными данными. Публикации по теме работы приняты в рецензируемые научные журналы.

## **Апробация работы**

Работа выполнена в лаборатории физики нейтрона НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Результаты работы докладывались автором и обсуждались на научных семинарах, а также на следующих всероссийских и международных конференциях:

- 1) 6th International Workshop “Ultracold & Cold Neutrons. Physics & Sources”, Saint-Petersburg, Russia, 1–7 July 2007;
- 2) International Workshop on Particle Physics with Slow Neutrons, Grenoble, France, 29–31 May 2008;
- 3) 7th International Workshop “Ultracold & Cold Neutrons. Physics & Sources”, Saint-Petersburg, Russia, 8–14 June 2009;
- 4) International Workshop on UCN and Fundamental Neutron Physics (UCN2010), RCNP, Japan, 8–9 April 2010;
- 5) Physics of Fundamental Symmetries and Interactions – PSI2010, Paul Scherrer Institut, Switzerland, 11–14 October 2010;
- 6) XXI Собрание по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния (РНИКС-2010), Россия, Москва, 16–19 ноября 2010 г.;
- 7) 8th International Workshop “Ultracold & Cold Neutrons. Physics & Sources”, Saint-Petersburg, Russia, 11–21 June 2011;
- 8) Научная сессия-конференция секции ядерной физики Отделения физических наук РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Москва, Россия, 21–25 ноября 2011 г.;

- 9) Международная научная конференция «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях», Димитровград, Россия, 5–9 декабря 2011 г.;
- 10) The International Workshop on Non-Accelerator New Physics (NANPino-2013), Valday, Russia, 24–29 June 2013;
- 11) Physics of Fundamental Symmetries and Interactions – PSI2013, Paul Scherrer Institut, Switzerland, 8–12 September 2013;
- 12) Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (РНСИ-КС-2014), Санкт-Петербург, Россия, 27–31 октября 2014 г.;
- 13) Challenges of the World-Wide Experimental Search for the Electric Dipole Moment of the Neutron (nEDM2014), Ascona, Switzerland, 2–6 November 2014;
- 14) Международная сессия-конференция секции ядерной физики Отделения физических наук РАН, Москва, Россия, 17–21 ноября 2014 г.;
- 15) Neutron-Antineutron Oscillations at European Spallation Source Workshop #3, Chalmers, Sweden, 27–28 August 2015;
- 16) International Workshop: Probing Fundamental Symmetries and Interactions with UCN, Mainz, Germany, 11–15 April 2016;
- 17) 26th International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide, Australia, 11–16 September 2016;
- 18) The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 10–14 October 2016;
- 19) The 3rd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Moscow, Russia, 2–5 October 2017;
- 20) nEDM2017, Harrison Hot Springs, Canada, 15–20 October 2017;
- 21) Neutron-Antineutron Oscillations: Appearance, Disappearance, and Baryogenesis, Seattle, USA, 23–27 October 2017;

- 22) International Workshop on Particle Physics at Neutron Sources 2018, Grenoble, France, 24–26 May 2018;
- 23) Particle Physics with Neutrons at the ESS, Stockholm, Sweden, 10–14 December 2018;
- 24) 19-я Международная Ломоносовская конференция, Москва, Россия, 22–28 августа 2019 г.;
- 25) Physics of Fundamental Symmetries and Interactions – PSI2019, Paul Scherrer Institut, Switzerland, 20–25 October 2019.

В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных грантами под руководством А. К. Фомина:

- 1) РФФИ № 10-02-00217-а «Гравитационный спектрометр УХН для измерения времени жизни нейтрона с точностью 0,2 с»;
- 2) РФФИ № 12-02-12052-офи\_м «Сверхтекучий гелий в ядерных технологиях при производстве ультрахолодных нейтронов»;
- 3) Министерство образования и науки Российской Федерации № 8702 «Подготовка к эксперименту по поиску стерильного нейтрино на реакторе ВВР-М» (ФГБУ «ПИЯФ», Гатчина, 2012–2013);
- 4) РФФИ № 13-02-00570-а «Измерение времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой ультрахолодных нейтронов»;
- 5) РФФИ № 16-02-00778-а «Разработка проекта эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций на проектируемом источнике ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М».

В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных грантами под руководством А. П. Сереброва, в которых А. К. Фомин выступил в роли исполнителя:

- 1) РФФИ № 10-02-00224-а «Высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов для фундаментальных исследований по физике элементарных частиц»;

- 2) РФФИ № 11-02-91000-АНФ\_а «Бета-распад нейтрона и поиск отклонений от Стандартной модели»;
- 3) РФФИ № 12-02-12111-офи\_м «Эксперимент «Нейтрино-4» по поиску осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние»;
- 4) РФФИ № 14-22-03055-офи\_м «Поиск стерильного нейтрино на реакторе СМ-3»;
- 5) РФФИ № 14-02-00051-а «Установление нового предела на электрический дипольный момент нейтрона с двухкамерным спектрометром ПИЯФ»;
- 6) РФФИ № 14-22-00105 «Разработка высокоинтенсивных источников ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия и научная программа исследований для реакторов ПИК и ВВР-М».

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, 8 глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка литературы. Объем диссертации 208 страниц, она содержит 103 рисунка и 12 таблиц. Список литературы включает 225 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы. Описаны актуальность, цели и задачи, практическая значимость, структура и объем, основные положения, личный вклад автора и апробация диссертации.

**Глава 1. Среднемировое время жизни нейтрона.** В главе говорится о проблеме изменений времени жизни нейтрона. В эксперименте по измерению времени жизни нейтрона с гравитационной ловушкой [1] получено значение  $878,5 \pm 0,8$  с. Оно отличается на 6,5 стандартных отклонений от среднемирового значения  $885,7 \pm 0,8$  с PDG 2006 года и на 5,6 стандартных отклонений от эксперимента с наиболее точным в то время результатом  $885,4 \pm 0,9_{\text{стат}} \pm 0,4_{\text{сист}}$  с [2]. Это событие оказалось переломным в истории измерений времени жизни нейтрона и в дальнейшем получило название *neutron lifetime revolution*. Новое значение не было включено в мировое среднее PDG из-за большого различия результатов. С другой стороны, появление нового результата с высокой точностью измерений ставило под сомнение мировое среднее значение для времени жизни нейтрона. Для выхода из сложившейся ситуации были необходимы новые эксперименты, а также поиск возможных систематических ошибок в старых экспериментах.

В 2009 году было проведено Монте-Карло-моделирование эксперимента MAMBO I [3] и эксперимента с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов [2]. В обоих экспериментах найдена отрицательная поправка к времени жизни нейтрона приблизительно 6 с. В 2010 году была получена новая таблица результатов измерений времени жизни нейтрона с учетом полученных поправок и новых измерений. В результате было получено новое мировое среднее значения для времени жизни нейтрона  $880,0 \pm 0,9$  с, которое находится в согласии с результатом эксперимента с гравитационной ловушкой.

Анализ нейтронного бета-распада с новым среднемировым значением для времени жизни нейтрона оказался в согласии со Стандартной моделью.



Рисунок 1 показывает зависимость матричного элемента смешивания кварков  $|V_{ud}|$  от  $|\lambda|$  при разных значениях времени жизни нейтрона. Пересечение данных для  $\tau_n$  и  $|\lambda|$  дает значение  $|V_{ud}|$  из распада нейтрона, которое можно сравнить со значением  $|V_{ud}|$  из сверхразрешенных  $0^+ \rightarrow 0^+$  ядерных переходов и со значением  $|V_{ud}|$  из унитарности матрицы ККМ ( $V_{ud}^2 + V_{us}^2 + V_{ub}^2 = 1$ ).

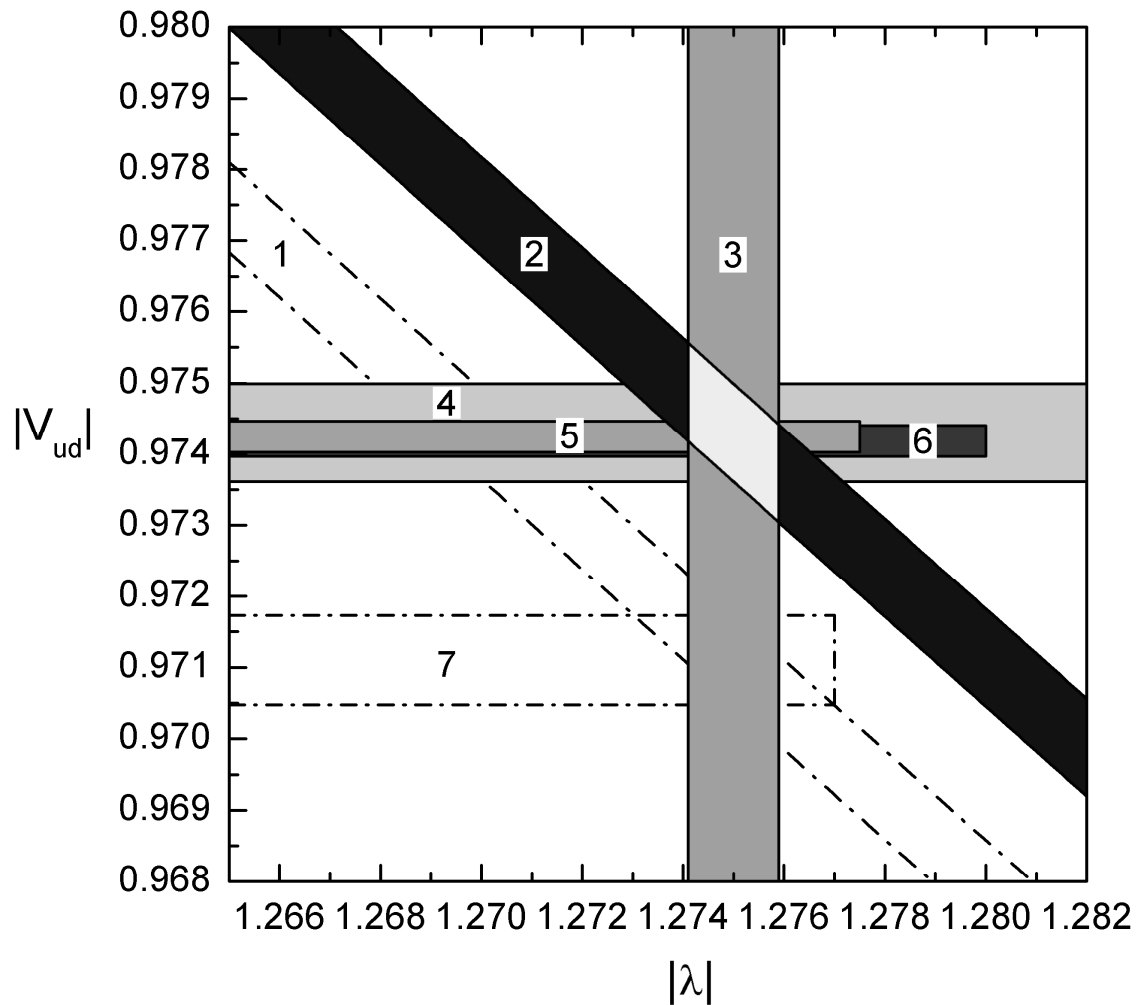


Рис. 1. Зависимость матричного элемента смешивания кварков  $|V_{ud}|$  от  $|\lambda|$  при разных значениях времени жизни нейтрона: 1 – время жизни нейтрона, PDG 2006; 2 – время жизни нейтрона,  $880,0 \pm 0,9$  с; 3 – асимметрия бета-распада нейтрона, Perkeo 2007; 4 – бета-распад нейтрона,  $880,0 \pm 0,9$  с и Perkeo 2007; 5 – унитарность; 6 – ядерный бета-распад; 7 – бета-распад нейтрона, PDG 2006 и Perkeo 2007

Дополнительно был проведен отдельный анализ результатов измерения времени жизни нейтрона с хранением УХН и в пучковых экспериментах. Распределение двух групп данных представлено на рис. 2. Обнаруженная разница в результатах экспериментов с хранением и пучковых экспериментов составила  $3,3\sigma$ .

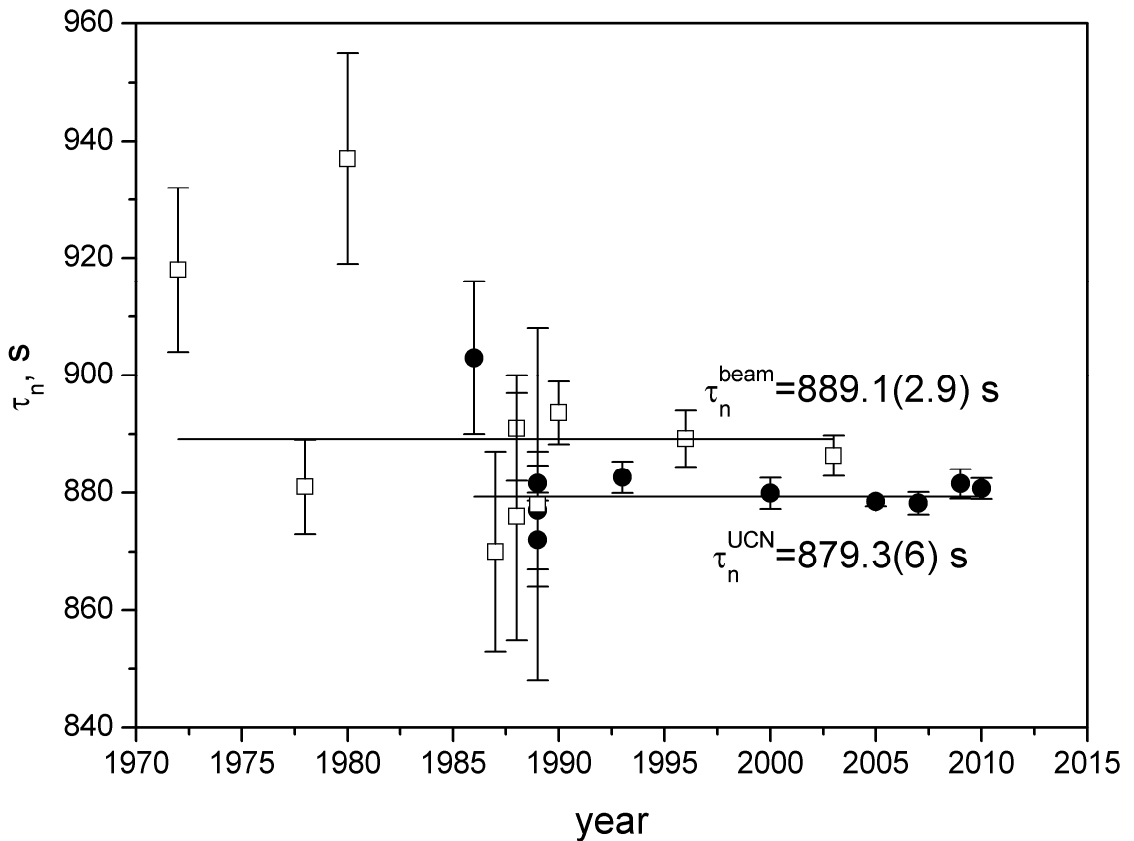


Рис. 2. Две группы результатов измерения времени жизни нейтрона в историческом порядке: ● – эксперименты с УХН; □ – пучковые эксперименты

В 2012 году экспериментальные группы обоих смоделированных экспериментов поправили свои результаты. К настоящему моменту был проведен ряд новых экспериментов. Значение PDG 2018 года составляет  $880,2 \pm 1,0 \text{ s}$ . Расхождение пучковых экспериментов и экспериментов с хранением сохраняется и получило название нейтронной аномалии, которая вызывает большой интерес и породила ряд гипотез, пытающихся ее объяснить.

**Глава 2. Эксперимент МАМВО I.** В главе говорится о моделировании эксперимента по измерению времени жизни нейтрона МАМВО I [3]. Эксперимент основан на хранении УХН в материальной ловушке с фомблиновым покрытием при комнатной температуре. Параллельные исследования показали, что на поверхности фомблина при комнатной температуре наблюдается квазиупругое рассеяние УХН. Был предложен механизм, объясняющий квазиупругое рассеяние за счет поверхностных волн. Данная теория была использована в проведенном Монте-Карло-моделировании эксперимента МАМВО I.

Схема эксперимента показана на рис. 3. Объем хранения УХН – прямоугольный параллелепипед с постоянными высотой 30 см и шириной 40 см, но изменяемой длиной  $x < 55$  см. Идея эксперимента состоит в получении времени жизни нейтрона путем экстраполяции за счет изменения средней длины свободного пробега нейтрона между соударениями со стенками при изменении длины экспериментального объема:

$$\tau_{st}^{-1} = \tau_n^{-1} + \mu(v)v(v) = \tau_n^{-1} + \mu(v)v / \lambda, \quad (2.1)$$

где  $\tau_{st}$  – время хранения нейтронов;  $\tau_n$  – время жизни нейтрона;  $\mu(v)$  – вероятность потери нейтрона на соударение;  $v(v)$  – частота соударений;  $\lambda = 4V / S$  – длина свободного пробега;  $V$  – объем ловушки;  $S$  – площадь поверхности ловушки. Формула (2.1) показывает линейную зависимость обратного времени хранения от обратной средней длины свободного пробега. Таким образом, вероятность бета-распада нейтрона можно получить путем экстраполяции  $\tau_{st}^{-1}$  к нулевой частоте соударений со стенками.

Экстраполяция описанным способом справедлива для моноэнергетического спектра. Для полного спектра она невозможна, потому что спектр меняет свою форму с течением времени из-за того, что  $\mu(v)$  и  $v(v)$  зависят от скорости нейтрона. Для исключения влияния изменения спектра в

эксперименте фиксировалось число соударений для разных размеров ловушки за счет подбора времени удержания УХН. Это получается за счет выполнения отношения

$$\frac{t_2(i)}{t_2(j)} = \frac{t_1(i)}{t_1(j)} = \frac{\lambda(i)}{\lambda(j)} = \frac{t_2(i) - t_1(i)}{t_2(j) - t_1(j)}, \quad (2.2)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – времена удержания для вычисления  $\tau_{st}^{-1}$ ;  $i$  и  $j$  – индексы, соответствующие разным объемам.

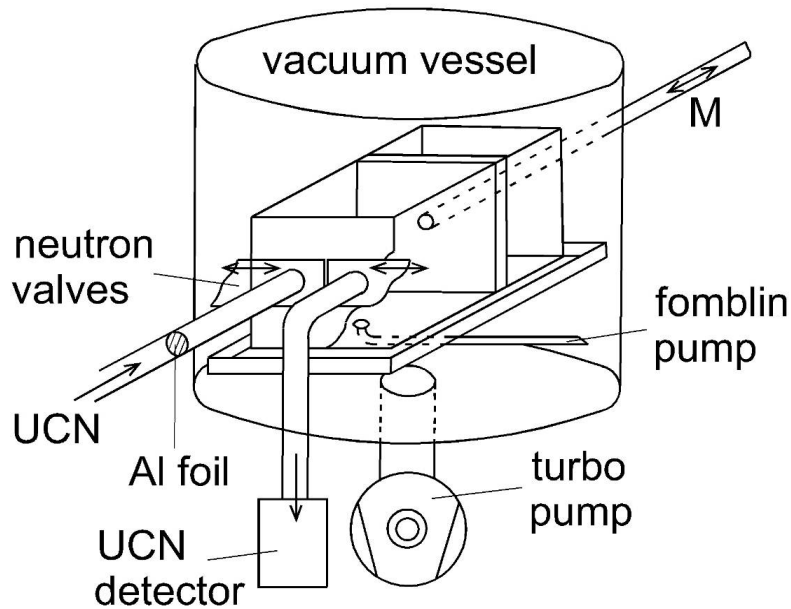


Рис. 3. Схема эксперимента МАМВО I

Монте-Карло-моделирование эксперимента было проведено с учетом гравитации и квазиупругого рассеяния УХН при отражениях от фомблина. Относительное влияние того или иного эффекта (надбарьерных нейтронов или квазиупругого рассеяния) на окончательный результат было исследовано при помощи его включения или выключения в моделировании. Была исследована зависимость результатов от начального спектра УХН, также было проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, которое показало хорошее согласие.

Получены спектры УХН в ловушке после различных интервалов времени удержания с учетом квазиупругого рассеяния и без него.

В результате моделирования получен суммарный эффект из-за надбарьерных нейтронов и квазиупругого рассеяния. Эти эффекты не были приняты во внимание в работе [3]. В таблице 1 показаны данные из работы [3], а также полученные поправки. Для получения окончательного результата использованы данные для длинных времен удержания, так как они дают основной статистический вклад и не зависят от начальных условий (форма спектра, зеркальность подвижной стенки). Полученная суммарная поправка составляет  $-6,0 \pm 1,6$  с. Она примерно компенсирует поправку работы [3]. Систематическая ошибка в работе [3] составляет 3 с, что покрывает в значительной степени отсутствие полной информации о деталях эксперимента.

Таблица 1. Значения  $\tau_n$ , полученные для разных интервалов удержания\*

Интервал удержания, с	$\tau_n$ , с (без поправки)	$\Delta\tau$ , с	$\tau_n$ , с (с поправкой)	$\Delta\tau'$ , с	$\tau'_n$ , с
112,5–225	893(10)	$\sim -2$	891(10)	–	–
225–450	885,0(4)	+3,5	888,5(4)	–	–
450–900	881,2(2,5)	+8	889,2(2,5)	-7,84 (0,87)	881,36 (2,65)
900–1 800	878,0(1,5)	+9	887,0(1,5)	-5,29 (0,70)	881,71 (1,65)
1 800–3 600	878,5(2,6)	+8,6	887,1(2,6)	-5,54 (0,87)	881,56 (2,74)
			$\tau_n = 887,6(1,1)$		$\tau'_n = 881,6(1,2)$

\*  $\tau_n$  – значения из работы [3];  $\Delta\tau$  – поправка из работы [3];  $\Delta\tau'$  – поправка из-за надбарьерных нейтронов и квазиупругого рассеяния,  $\tau'_n = \tau_n$  (с поправкой) +  $\Delta\tau'$ .

### Глава 3. Эксперимент с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов.

В главе говорится о моделировании эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов [2]. Эксперимент основан на хранении УХН в материальной ловушке с фомблиновым покрытием. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

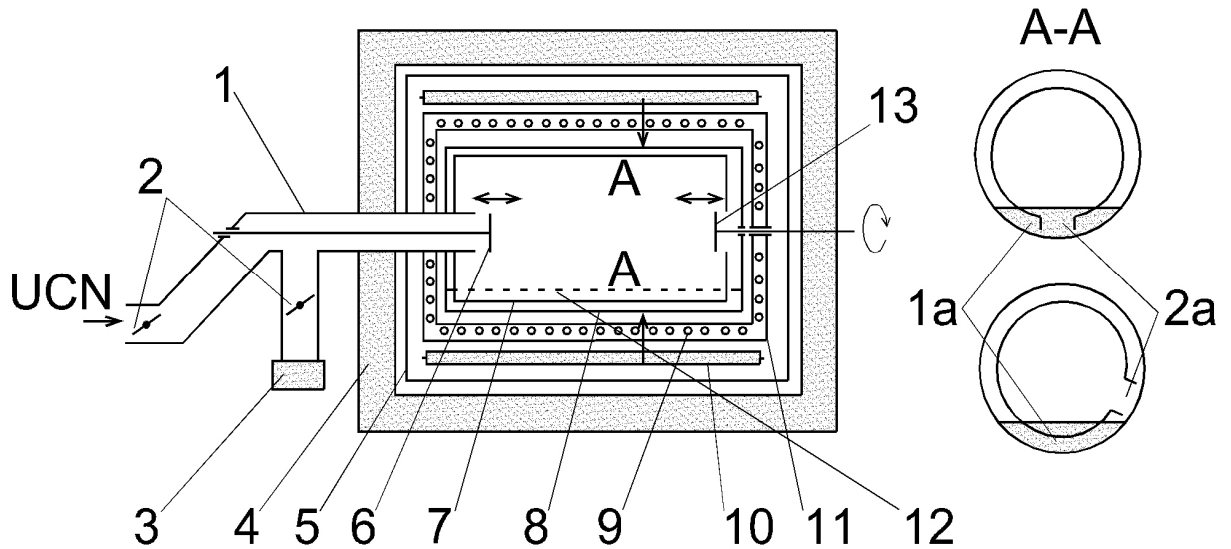


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – подводящий нейтронный подвод; 2 – заслонки УХН; 3 – детектор УХН; 4 – борированный полиэтилен; 5 – кадмиевый чехол; 6 – заслонка внутреннего сосуда; 7 – внутренний сосуд; 8 – внешний сосуд; 9 – змеевик охлаждения; 10 – счетчик тепловых нейтронов; 11 – вакуумный кожух; 12 – уровень масла; 13 – заслонка зазора; 1а – уровень масла; 2а – щель

Конструкция установки позволяет хранить УХН либо во внутреннем цилиндре, либо в зазоре между цилиндрами, что позволяет менять вероятность потерь УХН в пять раз без нарушения вакуума. Во время хранения неупруго рассеянные нейтроны регистрируются детектором тепловых нейтронов, окружающим установку. Идея эксперимента состоит в использовании уравнения

$$\lambda = \lambda_n + a\lambda_{ie}, \quad (3.1)$$

где  $\lambda$  является полной вероятностью исчезновения УХН за единицу времени из-за бета-распада и потери при соударении со стенкой сосуда;  $\lambda_{ie}$  – вероятность потерь из-за неупругого рассеяния;  $a = 1 + \sigma_{cap} / \sigma_{ie}$  является константой для данного материала стенки и ее температуры. Время жизни нейтрона получается путем экстраполяции к нулевому значению  $\lambda_{ie}$  (рис. 5). В моделировании были исследованы три эффекта.

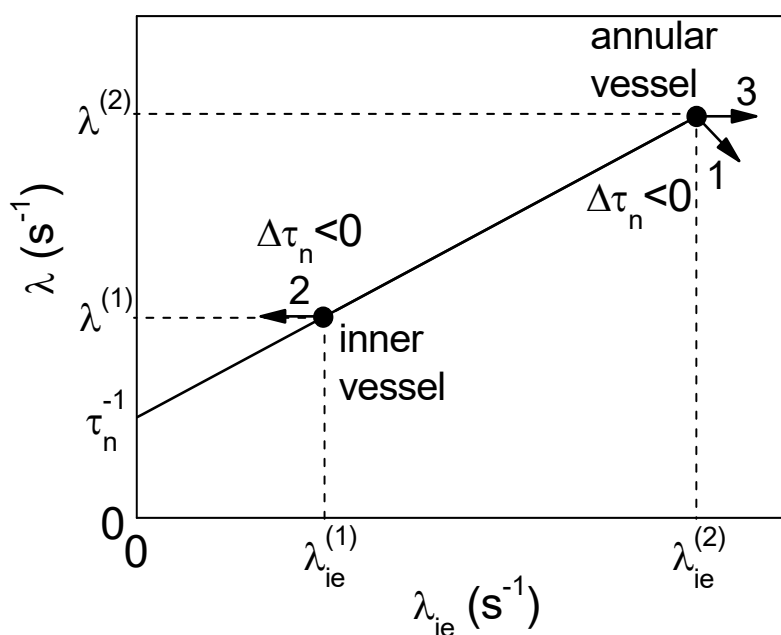


Рис. 5. Диаграмма, показывающая влияние различных эффектов на значение измеренного времени жизни нейтрона: 1 – эффект неполного вытекания из внутреннего объема во время чистки при работе с внешним объемом; 2 – эффект нагрева нейтронов затворами; 3 – эффект разной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных объемов

Эффект неполного вытекания из внутреннего объема во время чистки при работе с внешним объемом может возникнуть в связи с тем, что процесс вытекания УХН на детектор после удержания во внутреннем или внешнем объеме происходит по-разному. Вытекание из внутреннего объема происходит сразу через нейтронпроводную систему на детектор, однако при вытекании из внешнего объема нейтроны сначала попадают во внутренний объем.

Эффект нагрева нейтронов затворами возникает в связи с тем, что при своем движении они производят либо нагрев, либо охлаждение нейтронного спектра в зависимости от направления движения затвора. В случае работы с внутренним объемом затворы двигаются в объем с УХН. При этом происходит в основном нагрев нейтронов. При работе с внешним объемом в основном происходит охлаждение нейтронов, так как затвор двигается от объема с УХН.

Эффект разной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных объемов появляется из-за того, что детектор тепловых нейтронов не покрывает всю внешнюю поверхность установки. К сожалению, в работе [2] этот эффект недооценен (+0,6 с) и ошибочно взят с неправильным знаком.

Из рисунка 5 видно, что каждый рассмотренный эффект дает отрицательную поправку для измеренного значения времени жизни нейтрона. Полученные поправки представлены в табл. 2. Полученная суммарная поправка составляет  $-5,5 \pm 2,4$  с.

Таблица 2. Монте-Карло-поправки к измеренному времени жизни нейтрона в работе [2]

№ эффекта*	Название эффекта	Поправка, с	Неопределенность, с
1	Неполное вытекание	0	1
2	Нагрев затворами	-2,8	2
3	Эффективность детектора	-2,1	1
	Эффективность детектора (поправка в эксперименте +0,6 с)	-0,6	
Сумма		-5,5	2,4

\* См. рисунок 5.



**Глава 4. Источники УХН на основе сверхтекучего гелия.** В главе говорится о моделировании источников на основе сверхтекучего гелия на реакторах ВВР-М и ПИК. В настоящее время УХН успешно используются для фундаментальных исследований: для поиска ЭДМ нейтрона, измерения времени жизни нейтрона, асимметрий распада нейтрона и т. д. Точность этих экспериментов ограничена статистикой, поэтому имеется достаточно высокая активность в разработке новых высокоинтенсивных источников УХН.

УХН «рождаются» в гелии из холодных нейтронов с длиной волны 9 Å. Холодные нейтроны проникают через стенку ловушки, а ультрахолодные – отражаются, поэтому возможен эффект накопления УХН до плотности, определяемой временем хранения в ловушке с гелием.

На реакторе ВВР-М мощностью 18 МВт имеется тепловая колонна, которая позволяет разместить источник вблизи активной зоны реактора. В источнике планируется производить вывод УХН в две ловушки. Вывод УХН в основную ловушку происходит из камеры источника по горизонтальному нейтроноводу. Дополнительная ловушка будет располагаться на платформе. В нее будут попадать нейтроны, которые прошли через стенку камеры источника и были охлаждены за счет гравитационного торможения при подъеме вверх.

В результате моделирования получена плотность УХН для ловушек объемом 35 и 350 л. Выбранные размеры ловушек характерны для экспериментов по измерению ЭДМ нейтрона (35 л) и времени жизни нейтрона (350 л). В результате оптимизации параметров источника получена плотность УХН при температуре 1,2 К в основной ловушке  $\rho_{35\text{ л}} = 1,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  (для ловушки объемом 35 л) и  $\rho_{350\text{ л}} = 8,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  (для ловушки объемом 350 л). Для ловушки, расположенной на платформе, получена плотность  $\rho_{35\text{ л}} = 150 \text{ см}^{-3}$  и  $\rho_{350\text{ л}} = 120 \text{ см}^{-3}$ . Полученная плотность УХН на 2–3 порядка величины превышает плотность существующих источников УХН.

На реакторе ПИК мощностью 100 МВт рассмотрен вариант установки источников УХН на выведенных пучках. В условиях низкой тепловой нагрузки возможна работа источника при температуре 1 К. В результате моделирования получено, что плотность УХН в закрытой камере источника составляет  $4,4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ , а плотность УХН в ловушках –  $\rho_{351} = 1,3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$  и  $\rho_{3501} = 0,7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ .

Сравнение источников УХН на реакторах ВВР-М и ПИК представлено в табл. 3 и на рис. 6. На рисунке 6 показана плотность УХН в зависимости от температуры He II в камере источника. Вдоль оси абсцисс дополнительно отложены значения времени хранения нейтронов в He II при данной температуре и значения тепловой нагрузки, которую можно снять при данной температуре.

Таблица 3. Сравнительная характеристика источников ультрахолодных нейтронов

Параметры	ВВР-М, He II внутри тепловой колоны	ПИК, на пучках ГЭК-3 и ГЭК-4
$\Phi$ (тепловые), $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^{14}$
$d\Phi/d\lambda$ ( $9 \text{ \AA}$ ), $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{10}$	$10^9$
Объем источника, $\text{см}^3$	$3,5 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^5$
Полная производительность, $\text{с}^{-1}$	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^7$
Тепловая нагрузка на He, Вт	20	1
Температура, К	1,2	1.0
$\rho_{\text{ЭДМ}}$ , $\text{см}^{-3}$	$1,3 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^3$

Для сравнения на рис. 6 также показана плотность УХН в закрытой камере источника. Как видно из графика, эта плотность падает с ростом температуры, так как уменьшается время хранения нейтронов.

На реакторе ПИК источник УХН на основе сверхтекучего гелия может располагаться только на выведенном нейтронном пучке. Это приводит к потере исходной плотности нейтронного потока. Увеличение объема со сверхтекучим гелием и понижение его температуры не позволяют достичь уровня плотности УХН на источнике на реакторе ВВР-М. Таким образом, источник УХН в тепловой колонне реактора ВВР-М является в 10 раз более эффективным.

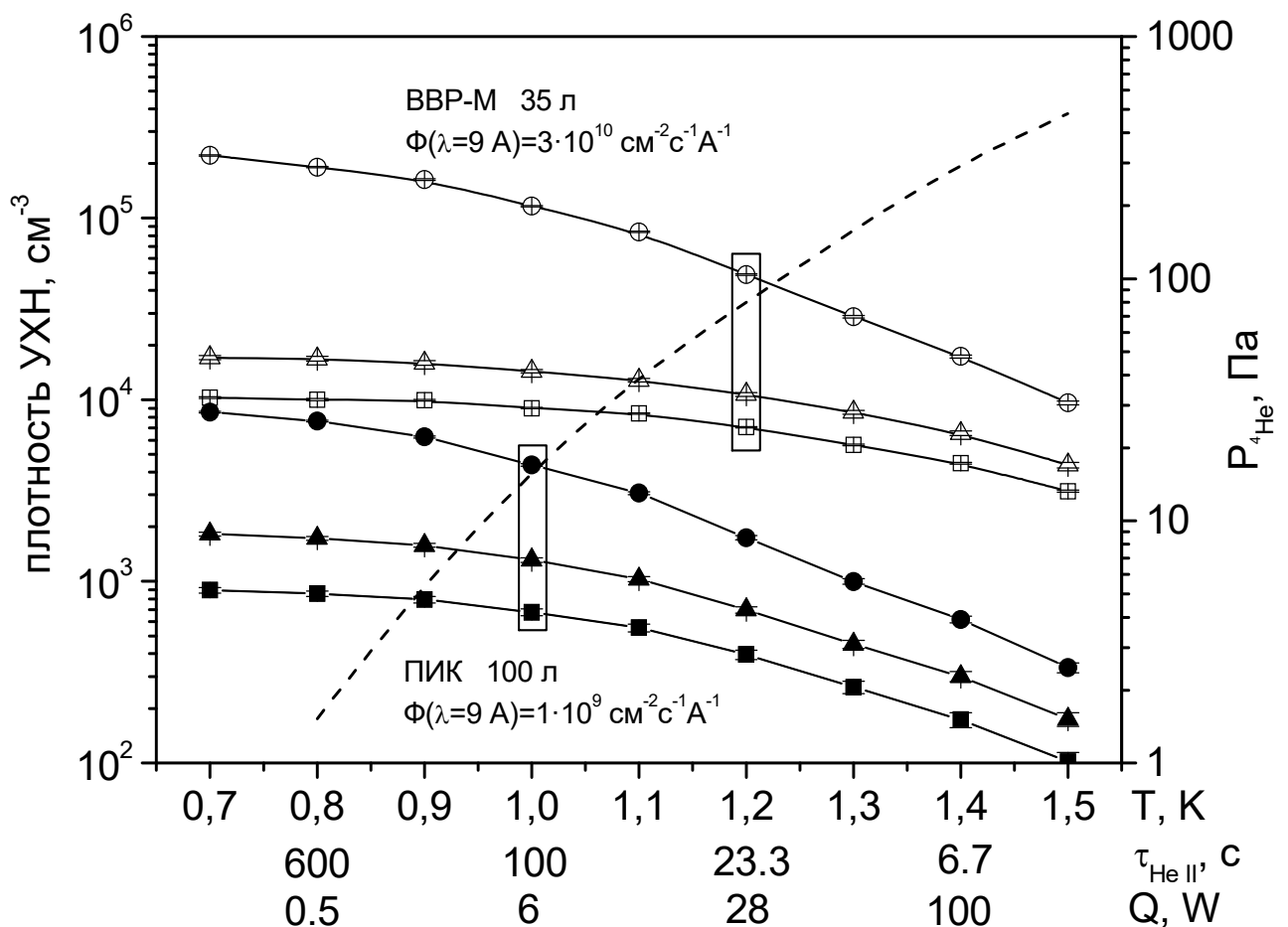


Рис. 6. Сравнение плотностей УХН в источниках на реакторах ВВР-М и ПИК: ● – в закрытой камере источника; ▲ – в ловушке объемом 35 л; ■ – в ловушке объемом 350 л. Пунктирная линия – зависимость давления насыщенных паров гелия от температуры

**Глава 5. Эксперимент с большой гравитационной ловушкой.** В главе говорится о моделировании эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой. Эксперимент является дальнейшим развитием методов и подходов, применявшихся в эксперименте [1]. Изменение частоты соударений УХН в ловушке достигается путем опускания в ловушку дополнительной поверхности – вставки. Стенки ловушки и вставки покрыты полимером Fomblin-grease UT-18. Измерения происходят при температуре 80–100 К. Схема экспериментальной установки показана на рис. 7.

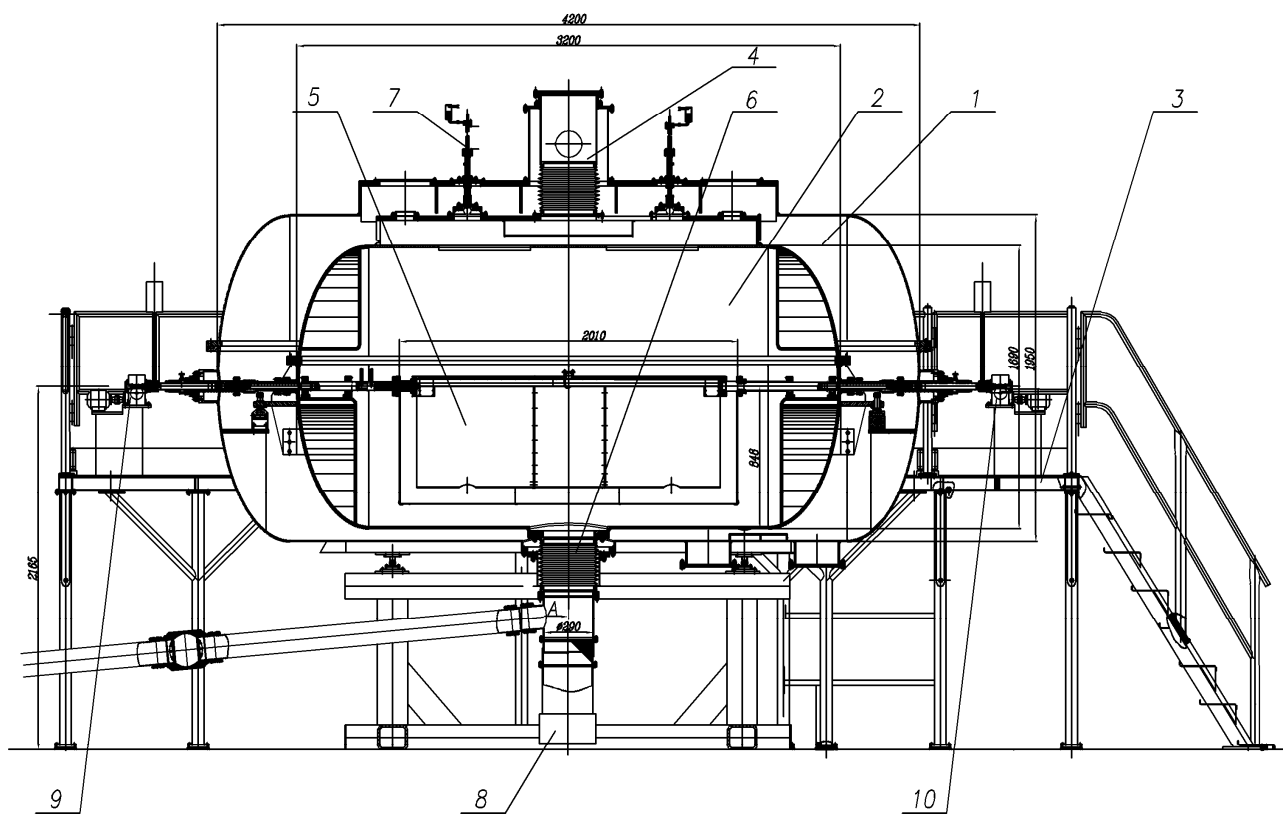


Рис. 7. Экспериментальная установка: 1 – наружный вакуумный сосуд; 2 – внутренний вакуумный сосуд; 3 – платформа для обслуживания; 4 – ввод для откачки внутреннего сосуда; 5 – ловушка со вставкой в нижнем положении; 6 – нейтронная система; 7 – система напыления ловушки и вставки; 8 – детектор; 9 – механизм поворота ловушки; 10 – механизм поворота вставки

Принцип измерений основан на соотношении

$$\tau_{st}^{-1} = \tau_n^{-1} + \tau_{loss}^{-1} = \tau_n^{-1} + \eta\gamma, \quad (5.1)$$

где  $\tau_{st}^{-1}$  – полная вероятность потерь нейтронов в ловушке;  $\tau_n^{-1}$  – вероятность бета-распада;  $\tau_{loss}^{-1}$  – вероятность потерь в стенках ловушки;  $\eta$  – независимый от энергии УХН фактор потерь;  $\gamma$  – получаемая расчетом эффективная частота соударений, которая зависит от энергии УХН и размеров ловушки. Время жизни нейтрона ( $\tau_n$ ) получается линейной экстраполяцией  $\tau_{st}^{-1}$  к нулевому значению  $\gamma$ .

В Монте-Карло-модели закладывается конкретное значение времени жизни нейтрона  $\tau_{n0}$ , затем моделируется процесс измерений и проводится обработка данных так же, как в эксперименте. В результате экстраполяции получается измеренное значение времени жизни нейтрона, которое затем сравнивается с  $\tau_{n0}$ , и делается вывод о систематической ошибке.

На стадии проектирования проведен анализ и сделаны выводы о конструктивных элементах установки.

В результате моделирования получены временные диаграммы счета детектора УХН, которые совпадают с экспериментальными (рис. 8). Для каждого расчета получены спектры УХН, которые регистрируются детектором. Эти спектры использовались в эксперименте для вычисления эффективной частоты соударений.

Подробно рассмотрены три схемы измерений: 1) с мониторингом (поворот ловушки для очистки от нейтронов, превышающих ее гравитационный барьер) без поглотителя; 2) без мониторинга с поглотителем; 3) с мониторингом и с поглотителем.

Проведен ряд расчетов с вариацией различных параметров эксперимента: количество сливов нейтронов на детектор, пробелы в напылении, использование поглотителя, временная диаграмма эксперимента. Во всех

расчетах принятое в модели время жизни нейтрона воспроизведено с точностью 0,1 с. Эта ошибка принята как систематическая неопределенность метода размерной экстраполяции из-за использования расчетного значения  $\gamma$ . Полный список систематических ошибок, полученных в результате Монте-Карло-моделирования представлен в табл. 4.

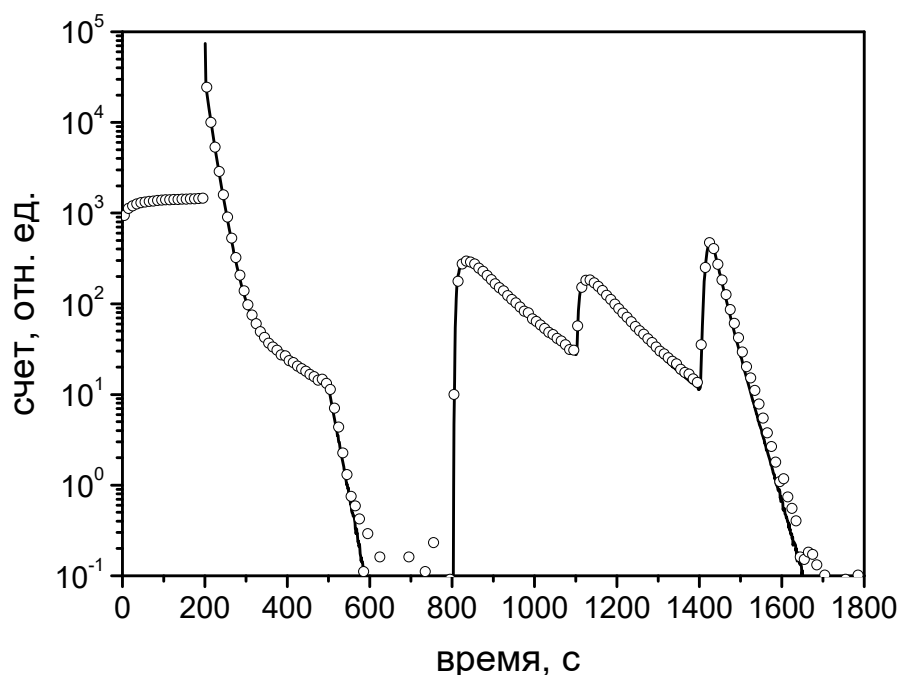


Рис. 8. Временная диаграмма измерений без вставки. Сплошная линия – расчет;  $\circ$  – эксперимент

Таблица 4. Систематические погрешности полученные в результате Монте-Карло-моделирования

Систематические эффекты	Значение, с
Неопределенность функции потерь УХН при соударениях	0,3
Неточность расчета $\gamma$	0,1
Неточность установки угла ловушки ( $2^\circ$ )	0,1

С учетом других систематических эффектов полная систематическая неопределенность составила 0,6 с. В результате эксперимента получено время жизни нейтрона  $881,5 \pm 0,7_{\text{стат}} \pm 0,6_{\text{сист}}$  с [4].

**Глава 6. Эксперимент по поиску ЭДМ нейтрона.** В главе говорится о моделировании эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона при помощи двухкамерного магнитно-резонансного спектрометра с длительным удержанием УХН. Схема установки представлена на рис. 9.

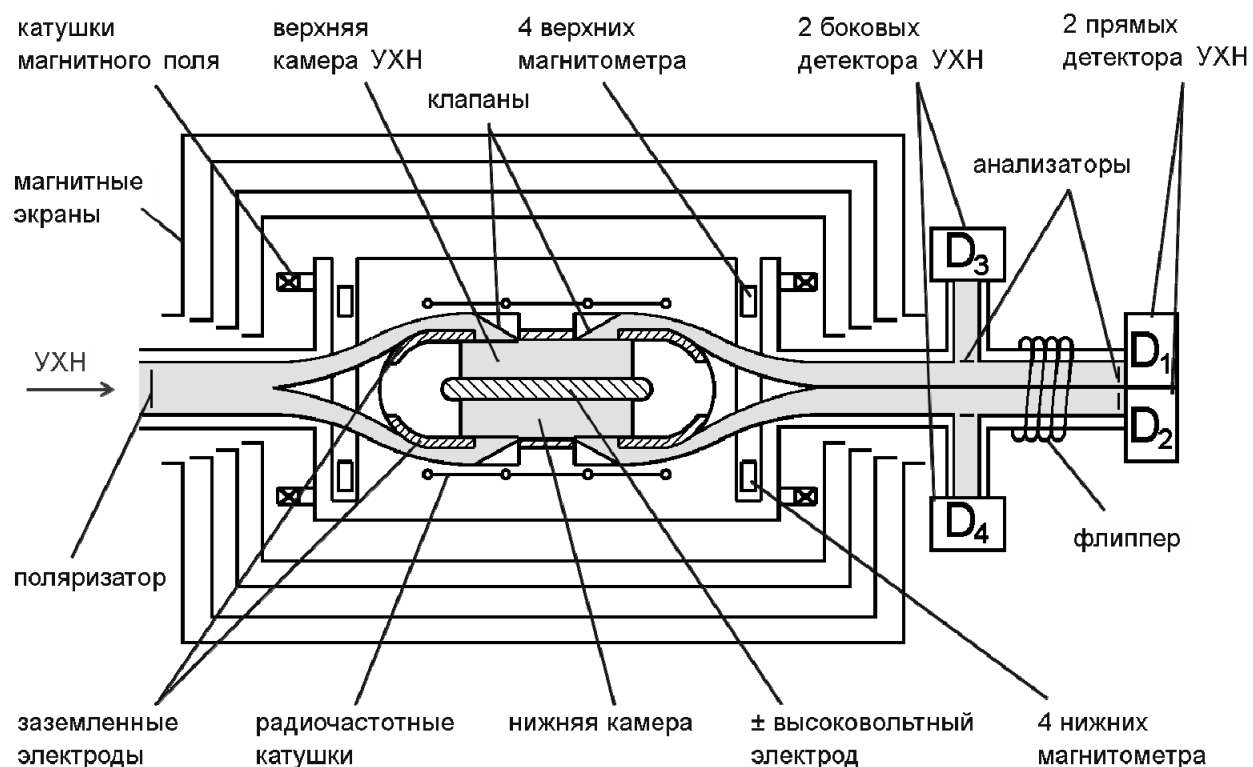


Рис. 9. Схема двухкамерного ЭДМ-спектрометра ПИЯФ

Разработана Монте-Карло-модель эксперимента, включающая нейтроноводную систему и ловушки УХН. Были проведены моделирование ЭДМ-измерений и прямой расчет влияния токов утечки на результат измерений. Для выбранной конфигурации токов утечки рассчитывалось магнитное поле, которое складывалось с ведущим полем  $\mathbf{B}_0$ . Полученная конфигурация магнитного поля использовалась для расчета. Дисперсия полученных результатов может служить оценкой величины возможного влияния тока утечки на измеряемую величину ЭДМ.

В расчете моделировалась траектория каждого нейтрона от момента входа в нейтроноводную систему до момента окончания хранения в одной из камер.

На рисунке 10 показаны распределения результатов расчета для камер и для спектрометра в целом. Дисперсия результатов для окончательного результата в  $\sim 2,6$  раза ниже, чем для отдельных камер. Это связано с тем, что магнитное поле от токов утечки в одной камере приводит к эффекту другого знака в соседней камере. Таким образом, ширина распределения  $10^{-28} e \cdot \text{см}/\text{nA}$  может быть взята в качестве верхнего предела систематического эффекта от токов утечки для наихудшего варианта, когда конфигурация токов утечки сохраняется. В этом случае систематический эффект при токах утечки  $< 100 \text{ nA}$  составит  $< 10^{-26} e \cdot \text{см}$  [5].

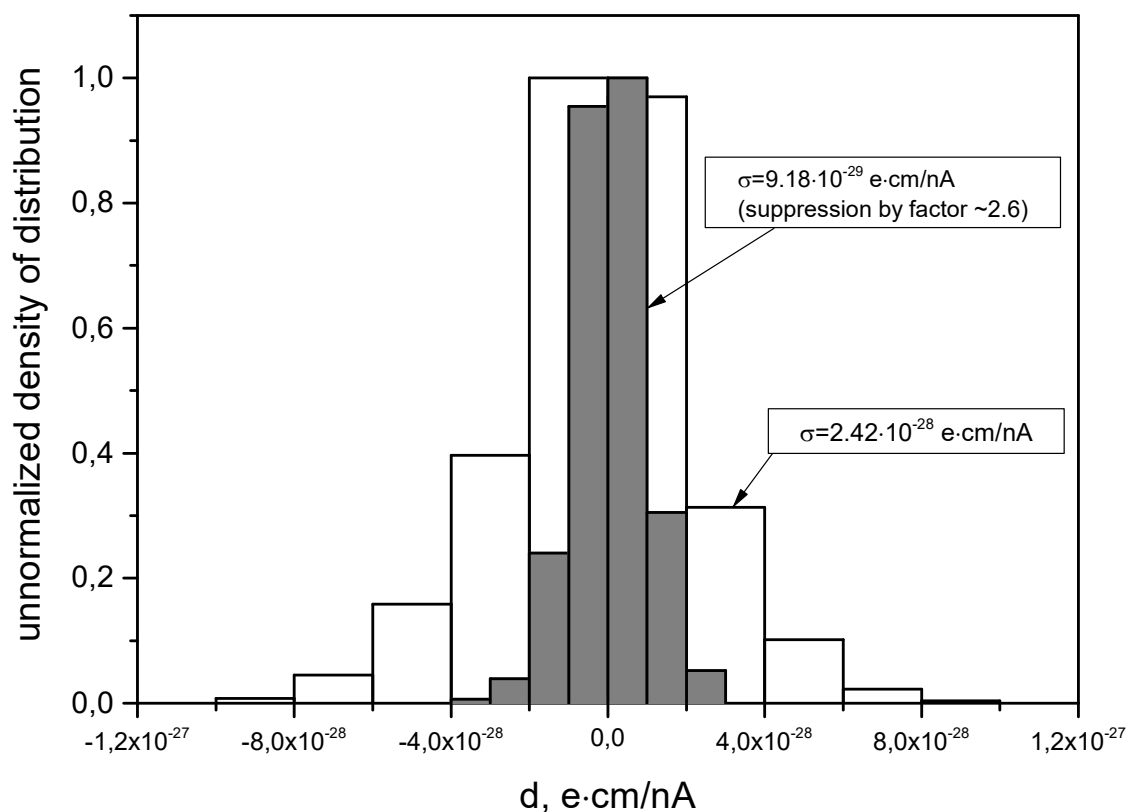


Рис. 10. Распределение результатов расчета для случайных конфигураций токов утечки. Представлены гистограммы вычислений для двух независимых камер и для суммарного результата



**Глава 7. Поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций.** В главе говорится о моделировании эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с использованием УХН. В ИЛЛ (Гренобль, Франция) был осуществлен эксперимент на пучке холодных нейтронов от реактора [6]. Нейтроны пролетали расстояние около 60 м со скоростью около 600 м/с в откачанной и экранированной от магнитного поля трубе. Осцилляции предполагалось обнаружить по аннигиляции образовавшихся антинейтронов на мишени. Чувствительность эксперимента определяется выражением  $Nt^2$ , где  $N$  – число нейтронов, попадающих в мишень в секунду;  $t$  – время пролета нейтрона до мишени. За время измерений  $2,4 \cdot 10^7$  с антинейтронных событий зарегистрировано не было. Получена оценка на период осцилляций  $\tau_{n\bar{n}} \geq 0,86 \cdot 10^8$  с (90 % CL). Чувствительность эксперимента составила  $Nt^2 = 1,5 \cdot 10^9$  с.

В случае УХН роль мишени играют стенки ловушки. Такой эксперимент разрабатывается впервые. Он становится конкурентоспособным с пучковым экспериментом при наличии мощного источника УХН. На реакторе ВВР-М сейчас создается высокоинтенсивный источник УХН, в котором будет получена плотность на 2–3 порядка выше, чем на существующих в мире источниках данного типа. В связи с этим была произведена оценка чувствительности эксперимента с УХН на планируемом источнике по сравнению с чувствительностью эксперимента ИЛЛ. Оценка чувствительности эксперимента была проведена методом Монте-Карло. Рассмотрены два крайних случая: 1) реальная часть потенциала отражения для нейтрона и антинейтрона близки или совпадают; 2) реальная часть потенциала отражения для антинейтрона близка к нулю. В первом случае можно ожидать отражение антинейтронов от стенок и накопление антинейтронной фазы. Во втором случае такого накопления не может быть. Антинейтрон, входя в вещество, немедленно аннигилирует. Для первого случая коэффициент отражения антинейтронов не

может быть достаточно высоким из-за большой мнимой части потенциала отражения для антинейтрона из-за сечения аннигиляции.

Для оценки чувствительности эксперимента разработана Монте-Карло-модель. По результатам расчетов принято решение о том, что конструкция установки разрабатывается для ловушки УХН в форме горизонтального цилиндра диаметром 2 м и длиной 4 м. При этом чувствительность эксперимента ИЛЛ может быть превышена в 10–40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок (рис. 11). В соответствии с этим разработана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 12.

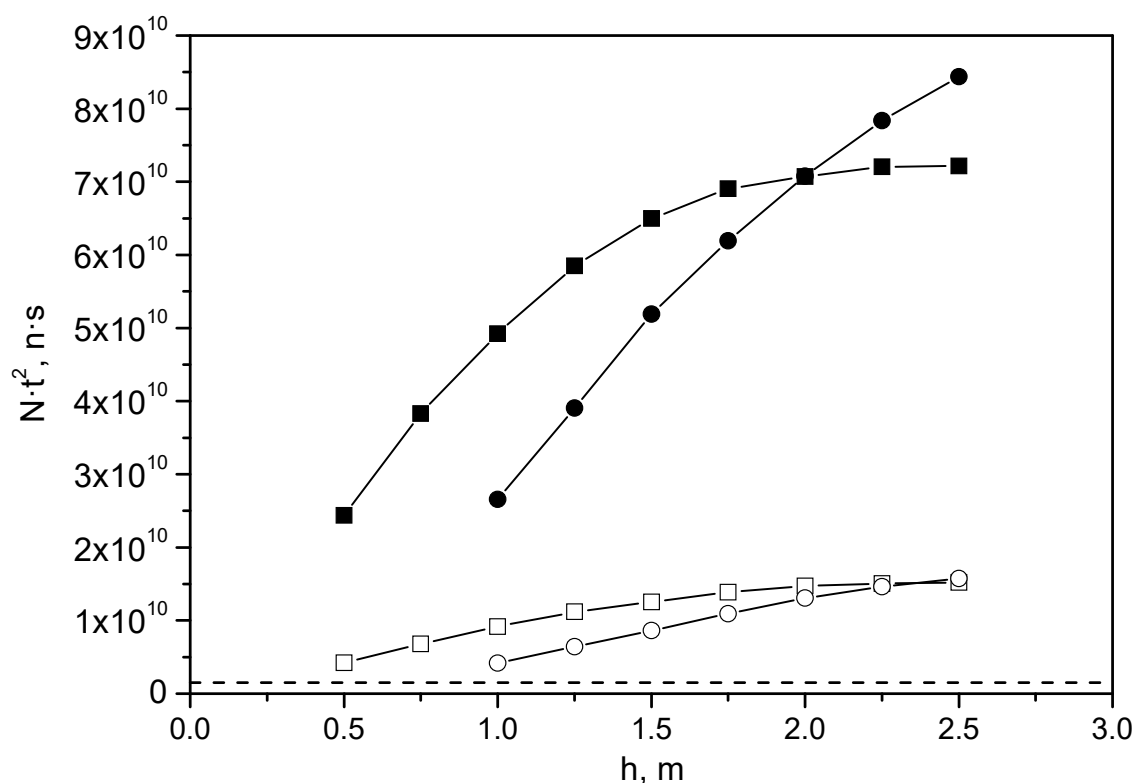


Рис. 11. Чувствительность эксперимента в зависимости от высоты ловушки УХН с прямоугольным (■) и круглым (●) сечением. Ширина ловушки с прямоугольным сечением составляет 2 м. Длина ловушек – 4 м. Заполненные значки соответствуют случаю с частичным накоплением антинейтронной фазы. Пустые значки соответствуют случаю без накопления антинейтронной фазы. Пунктирная прямая – чувствительность эксперимента ИЛЛ

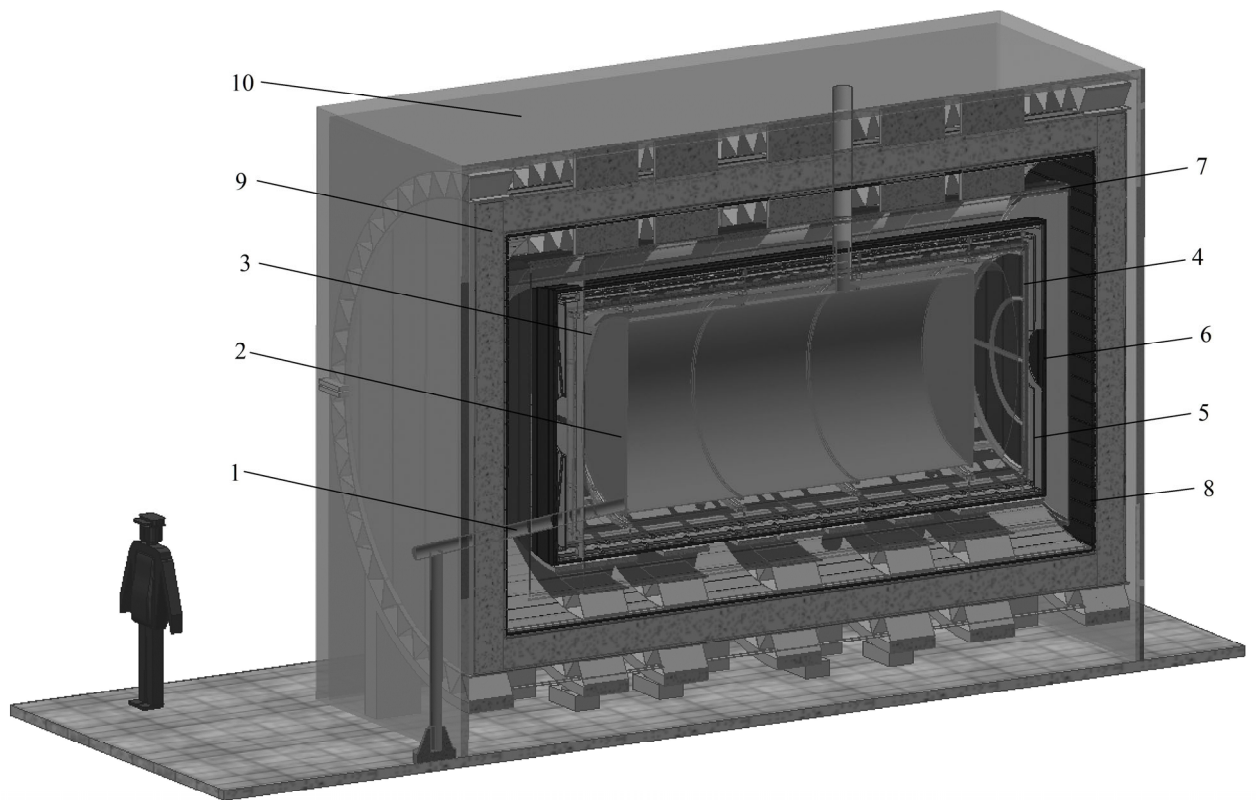


Рис. 12. Схема установки по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций: 1 – нейтроновод; 2 – ловушка УХН; 3 – вакуумная камера; 4 – внутренняя часть трекового детектора; 5 – двухслойный магнитный экран; 6 – внутренний слой годоскопа; 7 – промежуточный слой трекового детектора; 8 – внешний слой годоскопа; 9 – внешняя часть трекового детектора; 10 – активная защита

Следует отметить, что существует проект эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с холодными нейтронами на ESS-источнике. Планируется, что в нем будет улучшена чувствительность эксперимента ИЛЛ на 2–3 порядка, то есть приблизительно на порядок лучше, чем в рассмотренном варианте с УХН. Однако представляется важным получение результата в независимом эксперименте с использованием другой методики. Кроме того, реализация эксперимента с УХН является более компактной и менее дорогостоящей.

## Глава 8. Эксперимент «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино.

В главе говорится о моделировании эксперимента «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино на реакторе СМ-3 (Дмитровград, Россия). В настоящее время широко обсуждается гипотеза существования стерильного нейтрино. Предполагается, что из-за перехода реакторных антинейтрино в стерильное состояние будет наблюдаться эффект осцилляций на коротких расстояниях от реактора [7]. В эксперименте измерены зависимости нейтринного потока и нейтринного спектра на различных расстояниях от активной зоны реактора в диапазоне 6–12 м.

Если процесс осцилляций в стерильное состояние действительно имеет место, он может быть описан на коротких расстояниях следующей формулой:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2\left(1,27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{эВ}^2] L [\text{м}]}{E_{\bar{\nu}} [\text{МэВ}]}\right), \quad (8.1)$$

где  $E_{\bar{\nu}}$  – энергия антинейтрино;  $\Delta m_{14}^2$ ,  $\sin^2 2\theta_{14}$  – неизвестные параметры осцилляций. В ходе эксперимента необходимо проводить измерения потока и спектра антинейтрино как можно ближе к практически точечному источнику антинейтрино. Реактор СМ-3 обладает компактной активной зоной ( $35 \times 42 \times 42 \text{ см}^3$ ) при высокой мощности 100 МВт.

Детектор сцинтилляционного типа основан на использовании реакции  $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ . Сначала детектор регистрирует позитрон, энергия которого определяется энергией антинейтрино, а также два аннигиляционных гамма-кванта с энергией по 511 кэВ. Возникающий в реакции нейтрон поглощается гадолинием с образованием каскада гамма-квантов с суммарной энергией около 8 МэВ. В детекторе регистрируются два последовательных сигнала от позитрона и нейтрона. Схема детектора с пассивной и активной защитой представлена на рис. 13. Для моделирования детектора разработана Монте-Карло-модель. В процессе разработки и развития эксперимента произведено

моделирование различных вариантов детектора. К основным смоделированным конфигурациям можно отнести:

- 1) модель детектора без секционирования,
- 2) модель детектора с секционированием,
- 3) полномасштабный детектор без секционирования,
- 4) полномасштабный детектор с секционированием.

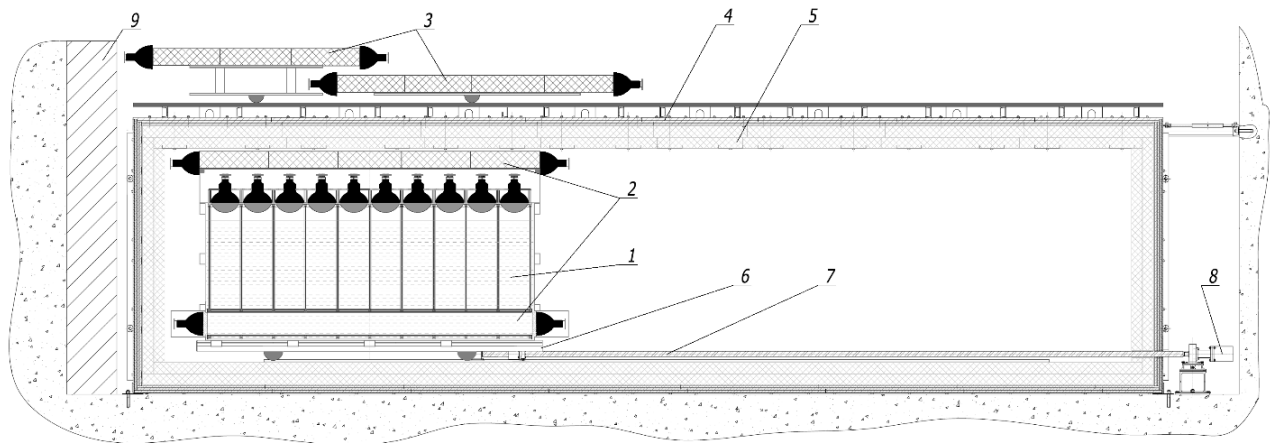


Рис. 13. Общая схема экспериментальной установки: 1 – детектор реакторных антинейтрино; 2 – внутренняя активная защита; 3 – внешняя активная защита (зонтик); 4 – стальная и свинцовая пассивная защита; 5 – борированный полиэтилен пассивной защиты; 6 – передвижная платформа; 7 – винт подачи; 8 – шаговый двигатель; 9 – защита от быстрых нейтронов из железной дробы

В эксперименте был измерен спектр мгновенных сигналов, который регистрируется детектором. Он связан с энергией антинейтрино соотношением  $E_{\text{prompt}} = E_{\bar{\nu}} - 1,8 \text{ МэВ} + 2 \cdot 0,511 \text{ МэВ}$ , где  $E_{\bar{\nu}}$  – энергия антинейтрино; 1,8 МэВ соответствует энергии порога реакции обратного бета-распада, а  $2 \cdot 0,511 \text{ МэВ}$  соответствует энергии аннигиляции позитрона. Экспериментальный спектр был сравнен с ожидаемым спектром мгновенных сигналов, рассчитанным по Монте-Карло-модели детектора. Пример такого сравнения представлен на рис. 14, где показан экспериментальный спектр мгновенных сигналов, усредненный по всем расстояниям с целью улучшить статистическую точность,

а также Монте-Карло-спектр мгновенных сигналов, при расчете которого использовался спектр антинейтрино для  $^{235}\text{U}$  и учитывались энергетические пороги экспериментальных сигналов. Было проведено сравнение расчетного спектра с измеренными на трех расстояниях: 7,3, 9,3 и 11,1 м. Характер отклонений экспериментального спектра от расчетного в рамках имеющейся точности оказался одинаковым для разных расстояний. В области 5 МэВ наблюдается так называемый бамп, как и в других реакторных экспериментах, однако его амплитуда больше, чем в экспериментах на атомных станциях. Если он связан с  $^{235}\text{U}$ , то это может быть объяснено высоким содержанием  $^{235}\text{U}$  (95 %) на реакторе СМ-3 в отличие от эффективного вклада  $^{235}\text{U}$  на различных атомных станциях. В дальнейшем в эксперименте «Нейтрино-4» был проведен безмодельный анализ экспериментальных данных без использования расчетного спектра.

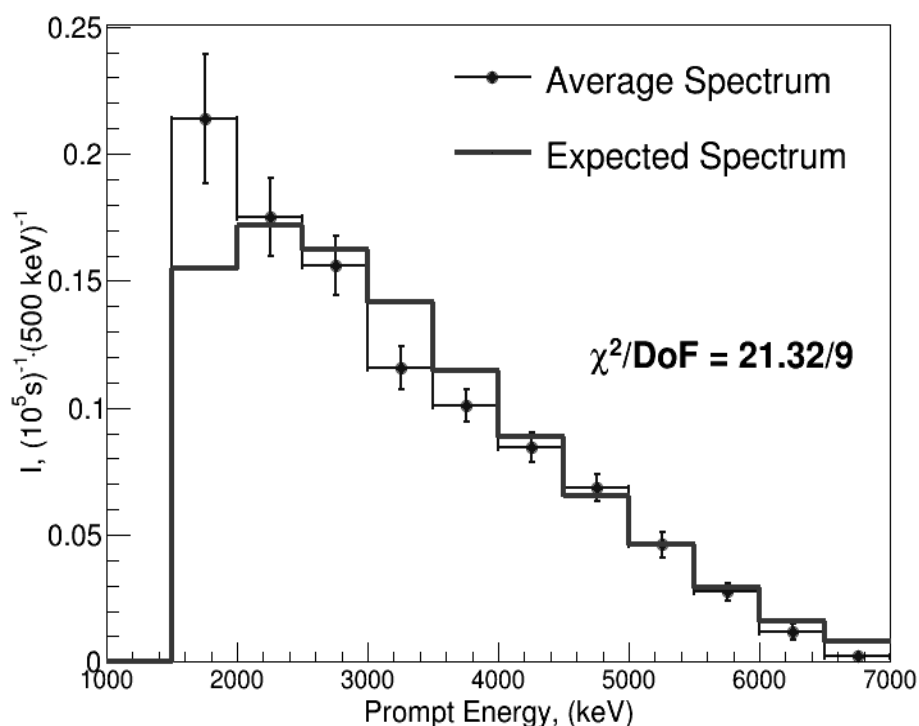


Рис. 14. Спектр мгновенных сигналов для всего цикла измерений, объединенный для всех расстояний (среднее расстояние 8,6 м). Сплошной линией показан спектр, полученный в результате Монте-Карло-моделирования

В конце диссертации дано краткое заключение и приведен список цитированной в работе литературы.

### **Список публикаций по теме диссертации**

1. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Monte Carlo Simulation of Quasi-Elastic Scattering and Above-Barrier Neutrons in the Neutron Lifetime Experiment MAMBO I // JETP Lett. 2009. V. 90. P. 555.
2. **Fomin A.K.**, Serebrov A.P., A Detailed Analysis and Monte Carlo Simulation of the Neutron Lifetime Experiment // JETP Lett. 2010. V. 92. P. 40.
3. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, The Problem of the Neutron Lifetime Measurements // JETP Lett. 2010. V. 92. P. 271.
4. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Neutron Lifetime from a New Evaluation of Ultracold Neutron Storage Experiments // Phys. Rev. C. 2010. V. 82. P. 035501.
5. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, New Evaluation of Neutron Lifetime from UCN Storage Experiments and Beam Experiments // Phys. Proc. 2011. V. 17. P. 199.
6. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, New Analysis of Neutron-Lifetime Experiments // Cryst. Rep. 2011. V. 56. P. 1248.
7. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Kharitonov A.G. *et al.*, New Installation for Measuring a Neutron Lifetime with a Big Gravitational Trap of Ultra Cold Neutrons // Tech. Phys. 2013. V. 58. P. 1681.
8. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Zinov'ev V.G. *et al.*, On the Possibility of Experimentally Confirming the Hypothesis of Reactor Antineutrino Passage into a Sterile State // Tech. Phys. Lett. 2013. V. 39. P. 636.
9. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Onegin M.S. *et al.*, The Project of Ultracold Neutron Sources at the PIK Reactor with Superfluid Helium as a Moderator // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. P. 10.
10. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Calculation of the Ultracold Neutron Yield from a Superfluid Helium Source in the WWR-M Reactor // Tech. Phys. 2015. V. 60. P. 1238.

11. Serebrov A.P., Kolomenskiy E.A. ... **Fomin A.K.** *et al.*, New Search for the Neutron Electric Dipole Moment with Ultracold Neutrons at ILL // *Phys. Rev. C*. 2015. V. 92. P. 055501.
12. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Onegin M.S. *et al.*, Monte Carlo Simulation of the Neutrino-4 Experiment // *Phys. Atom. Nucl.* 2015. V. 78. P. 1595.
13. Serebrov A.P., Ivochkin V.G., ... **Fomin A.K.** *et al.*, Neutrino-4 Experiment on the Search for a Sterile Neutrino at the SM-3 Reactor // *JETP*. 2015. V. 12. P. 578.
14. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Kharitonov A.G. *et al.*, High-Density Ultracold Neutron Sources for the WWR-M and PIK Reactors // *Cryst. Rep.* 2016. V. 61. P. 144.
15. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Kharitonov A.G. *et al.*, Neutron Lifetime Measurement on Setups with Gravitational Trap // *Cryst. Rep.* 2016. V. 61. P. 139.
16. Serebrov A.P., Kolomenskiy E.A., ... **Fomin A.K.** *et al.*, Neutron Electric Dipole Moment and Possibilities of Increasing Accuracy of Experiments // *Cryst. Rep.* 2016. V. 61. P. 129.
17. Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Kamyshkov Yu.A., Sensitivity of Experiment on Search for Neutron–Antineutron Oscillations on the Projected Ultracold Neutron Source at the WWR-M Reactor // *Tech. Phys. Lett.* 2016. V. 42. P. 99.
18. **Fomin A.**, Experiment on Search for N-NBAR Oscillations Using a Projected UCN Source at the WWR-M Reactor // *Proc. Sci.* 2016. V. 281. P. 189.
19. Serebrov A.P., Ivochkin V.G. ... **Fomin A.K.** *et al.*, Experiment for Search for Sterile Neutrino at SM-3 Reactor // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47. P. 1014.
20. Onegin M.S., Serebrov A.P., **Fomin A.K.**, Lyamkin V.A., Estimation of the Ultracold Neutron Production by a Source Designed for the WWR-M Reactor // *Tech. Phys.* 2017. V. 62. P. 633.



21. **Fomin A.K.**, Serebrov A.P., Simulation of Experiment on Measurement of Neutron Lifetime Using the Big Gravitational Trap of Ultracold Neutrons with the Absorber // *Tech. Phys.* 2017. V. 62. P. 1903.
22. **Fomin A.K.**, Serebrov A.P., Zherebtsov O.M. *et al.*, Experiment on Search for Neutron–Antineutron Oscillations Using a Projected UCN Source at the WWR-M Reactor // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 798. P. 012115.
23. Serebrov A., Ivochkin V. ... **Fomin A.** *et al.*, Neutrino-4 Experiment on Search for Sterile Neutrino with Multi-Section Model of Detector // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 888. P. 012089.
24. Serebrov A., Ivochkin V. ... **Fomin A.** *et al.*, Current Results of NEUTRINO-4 Experiment // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 934. P. 012010.
25. Serebrov A.P., Ivochkin V.G. ... **Fomin A.K.** *et al.*, Search for Sterile Neutrinos in the Neutrino-4 Experiment // *JETP Letters.* 2017. V. 105. P. 347.
26. Serebrov A.P., Ivochkin V.G. ... **Fomin A.K.** *et al.*, Experiment Neutrino-4 on Searching for a Sterile Neutrino with Multisection Detector Model // *Tech. Phys.* 2017. V. 62. P. 322.
27. Serebrov A.P., Kolomensky E.A., **Fomin A.K.** *et al.*, Neutron Lifetime Measurements with a Large Gravitational Trap for Ultracold Neutrons // *Phys. Rev. C.* 2018. V. 97. P. 055503.
28. Serebrov A.P., Ivochkin V.G. ... **Fomin A.K.** *et al.*, Sterile Neutrino Search in the Neutrino-4 Experiment at the SM-3 Reactor // *Phys. Part. Nucl.* 2018. V. 49. P. 701.
29. **Fomin A.K.**, Serebrov A.P., Monte Carlo Model of the Experiment on Measuring the Neutron Lifetime // *Math. Mod. Comp. Simul.* 2018. V. 10. P. 741.
30. Serebrov A.P., Ivochkin V.G. ... **Fomin A.K.** *et al.*, First Observation of the Oscillation Effect in the Neutrino-4 Experiment on the Search for the Sterile Neutrino // *JETP Lett.* 2019. V. 109. P. 213.

31. Serebrov A.P., Lyamkin V.A. ... **Fomin A.K.** *et al.*, Neutron Guide System for Ultracold and Cold Neutrons at the WWR-M Reactor // *Tech. Phys.* 2019. V. 64. P. 737.
32. Serebrov A.P., Lyamkin V.A., **Fomin A.K.** *et al.*, Status of UCN Supersource at WWR-M Reactor // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1390. P. 012101.
33. **Fomin A.**, Serebrov A., Chaikovskii M. *et al.*, Project on Searching for Neutron-Antineutron Oscillation at the WWR-M Reactor // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1390. P. 012133.

### **Цитируемая литература**

- [1] Serebrov A., Varlamov V., Kharitonov A. *et al.* Measurement of the Neutron Lifetime Using a Gravitational Trap and a Low-Temperature Fomblin Coating // *Phys. Lett. B.* 2005. V. 605. P. 72.
- [2] Arzumanov S., Bondarenko L., Chernyavsky S. *et al.* Neutron Lifetime Value Measured by Storing Ultracold Neutrons with Detection of Inelastically Scattered Neutrons // *Phys. Lett. B.* 2000. V. 483. P. 15.
- [3] Mampe W., Ageron P., Bates C. *et al.* Neutron Lifetime Measured with Stored Ultracold Neutrons // *Phys. Rev. Lett.* 1989. V. 63. P. 593.
- [4] Serebrov A.P., Kolomensky E.A., Fomin A.K. *et al.* Neutron Lifetime Measurements with a Large Gravitational Trap for Ultracold Neutrons // *Phys. Rev. C.* 2018. V. 97. P. 055503.
- [5] Serebrov A.P., Kolomenskiy E.A., Pirozhkov A.N. *et al.* New Search for the Neutron Electric Dipole Moment with Ultracold Neutrons at ILL // *Phys. Rev. C.* 2015. V. 92. P. 055501.
- [6] Baldo-Ceolin M., Benetti P., Bitter T. *et al.* A New Experimental Limit on Neutron-Antineutron Oscillations // *Zh. Phys. C.* 1994. V. 63. P. 409.
- [7] Mention G., Fehner M., Lasserre Th. *et al.* Reactor Antineutrino Anomaly // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 83. P. 073006.