Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт» — Петербургский Институт Ядерной физики им. Б.П. Константинова

На правах рукописи

ho

Коник Петр Иванович

Нейтроноводная система реактора ПИК

01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Григорьев С.В.

 Γ атчина — 2020

Оглавление

Введе	ние		5
Глава	1. He	ейтроноводы	14
1.1	Нейтр	ронные зеркала	14
1.2	Нейтр	роноводы постоянного сечения	18
	1.2.1	Прямые нейтроноводы	18
	1.2.2	Освещенность	20
	1.2.3	Потери	20
1.3	Изогн	нутые нейтроноводы	22
	1.3.1	Уход с прямой видимости	22
	1.3.2	Пропускающая способность	24
	1.3.3	Однородность пучка	26
1.4	Нейтр	роноводы переменного сечения	27
	1.4.1	Фокусирующие устройства	27
	1.4.2	Баллистические нейтроноводы	28
	1.4.3	Эллиптические и параболические нейтроноводы	29
1.5	Нейтр	роноводы-трансформеры	31
1.6	Нейтр	роноводные системы	32
	1.6.1	Существующие системы	32
	1.6.2	Проекты нейтроноводной системы реактора ПИК	33
1.7	Выво,	ды	35
Глава	2. Me	етодика	36
2.1	Мето	ды расчета нейтроноводов	36
2.2	Прогр	раммный пакет McStas	38
	2.2.1	Описание пакета	38
	2.2.2	Библиотека iFit	42

2.3	Верификация методики	42		
2.4	Выводы			
ъ				
Глава	3. Инструментарий моделирования нейтроноводных систем	45		
3.1	Оптимизация нейтроноводной системы	45		
3.2	Оценка потерь	47		
3.3	Инструменты с кристаллическими монохроматорами	51		
	3.3.1 Постановка задачи	51		
	3.3.2 Нейтроновод постоянного сечения	52		
	3.3.3 Расширяющийся нейтроновод	57		
	3.3.4 Эллиптический нейтроновод	61		
	3.3.5 Обсуждение	62		
3.4	Эффективность баллистических нейтроноводов	64		
3.5	Винтообразный нейтроновод	70		
	3.5.1 Постановка задачи	70		
	3.5.2 Модель винтообразного нейтроновода	70		
	3.5.3 Оптические свойства	71		
3.6	Восьмиугольный нейтроновод	74		
3.7	Выводы	80		
-		~ ~		
Глава	4. Нейтроноводная система реактора ШИК	82		
4.1	Общий вид нейтроноводной системы	82		
	4.1.1 Приборная база реактора ПИК	82		
	4.1.2 Конфигурация нейтроноводной системы	85		
4.2	Изогнутые нейтроноводы постоянного сечения	88		
4.3	Оптимизация концентраторов нейтронных пучков	93		
4.4	4 Характеризация нейтроноводной системы			
	4.4.1 Сравнение с вариантом нейтроноводной системой 2014	97		
	4.4.2 Характеристики источника холодных нейтронов	97		
	4.4.3 Сравнение нейтроноводной системы с зарубежными ана-			
	логами	.02		
4.5	Перспективы исследований			
4.6	Выводы	.05		

Заключение	106
Литература	108

Введение

Актуальность

В настоящее время методы нейтронного рассеяния активно применяются во многих областях прикладной и фундаментальной науки и, благодаря уникальным свойствам нейтрона, несомненно сохранят свое значение в будущем. В нейтронных экспериментах на образец падает пучок нейтронов с известными параметрами (например, длина волны, расходимость). Затем рассеянное излучение регистрируют и анализируют данные, получая ценную информацию о структуре и динамике образца. Методы нейтронного рассеяния используются для определения параметров кристаллических и магнитных структур, исследования многослойных, нано- и метаматериалов, решения структур белков, изучения атомной динамики и магнитных возбуждений, кинетики белковых объектов, а также для решения других задач физики, химии и биологии. Помимо научной ценности нейтроны также имеют важное промышленное значение. С помощью нейтронов можно проводить прецизионный химический анализ (гамма-активационный анализ), исследовать крупномасштабные неоднородности в изделиях (радиография), исследовать остаточные напряжение в материалах (стресс-дифрактометрия).

В Петербургском Институте Ядерной Физики НИЦ КИ — ПИЯФ в Гатчине создается международный центр нейтронных исследований на базе мощнейшего в своем классе источника нейтронов — высокопоточного реактора ПИК. В феврале 2019 года был проведен энергетический пуск реактора. В настоящее время ведется строительство более 20 нейтронных установок на специально выведенных пучках, некоторые из которых направлены в отдельный экспериментальный (нейтроноводный) зал. На реакторе ПИК, как и на большинстве других источников нейтронов, планируется создание нейтроноводной системы (HC). Нейтроноводной системой обычно называют несколько нейтроноводов, установленных на одном канале.

Нейтроноводы позволяют разместить установки на значительном удалении от реактора, что дает возможность радикально снизить фон γ -квантов и быстрых нейтронов, который высок вблизи реактора. Нейтроноводы можно «ветвить», располагая несколько приборов на одном канале. Это особенно важно для установок, использующих холодные нейтроны с длиной волны $\lambda > 4$ Å: число каналов, отходящих от источника холодных нейтронов, обычно мало, а потребность в приборах на холодных нейтронах — очень велика. Чаще всего нейтроноводы выводят пучки в отдельный нейтроноводный зал, что дает возможность разместить больше инструментов и более габаритные установки. Наконец, применение нейтроноводов позволяет довести до установки только «полезные» нейтроны — нейтроновод выступает в роли формирователя пучка с требуемыми сечением, расходимостью и спектральным составом.

Большинство существующих систем создавалось до широкого внедрения современных нейтронно-оптических устройств и до расцвета компьютерного моделирования нейтронных станций, а некоторые системы — даже до начала массового производства суперзеркал. Лишь с течением времени отдельные нейтроноводы этих систем подвергались модернизации. В этом контексте создание нейтроноводной системы реактора ПИК "с нуля" в современных условиях открывает большие возможности одновременной глубокой оптимизации всей системы и представляет важный практический интерес.

Цель работы

Повышение эффективности работы инструментов нейтронного рассеяния для физики конденсированного состояния на реакторе ПИК путем разработки оптимальной конфигурации нейтроноводной системы.

Поставленные задачи

1. Разработка общего подхода к проектированию нейтроноводных систем;

- 2. Поиск оптимальных оптических схем для типов инструментов, предлагаемых к строительству на реакторе ПИК;
- 3. Создание общего вида нейтроноводной системы реактора ПИК;
- 4. Оценка нейтронных потоков на выходах нейтроноводов.

Методология

Расчеты нейтроноводов выполнялись с использованием методов трассировки лучей и Монте-Карло, реализованных в программном пакете McStas. В настоящее время подобные расчеты широко используются при проектировании нейтронных установок, а их результаты подтверждаются экспериментальными данными.

Достоверность

Достоверность полученных результатов обеспечивается полнотой рассмотрения материала и применением верифицированной методики моделирования нейтронной оптики.

Научная новизна

Все результаты, полученные в данной работе, являются новыми.

Впервые предложена и реализована процедура разработки нейтроноводной системы "с нуля". Подход аналогичен процедуре place-and-route, использующейся при проектировании микросхем. Эффективность процедуры подтверждена высокими нейтронно-физическими характеристиками разработанной в данной диссертации нейтроноводной системы реактора ПИК, для которой найдены все необходимые геометрические параметры, а также проведено сравнение с аналогичными HC ведущих зарубежных центров.

Впервые проанализирована эффективность различных типов нейтроноводов применительно к инструментам, использующим кристаллические монохроматоры. Рассмотрены варианты нейтроновода постоянного сечения, эллиптического и расширяющегося нейтроноводов. Показано, что за исключением случая нереалистично большого образца оптимальным выбором является нейтроновод постоянного сечения.

Впервые проанализирована эффективность использования эллиптических нейтроноводов в условиях большого замедлителя. Проведено сравнение таких нейтроноводов с нейтроноводами, снабженными концентраторами. Установлено, что с учетом технологических ограничений эллиптические нейтроноводы имеют сравнительный выигрыш в пропускающей способности в области холодных нейтронов, а нейтроноводы с концентраторами — в области тепловых нейтронов.

Впервые создана численная модель винтообразного нейтроновода, позволяющая в широких пределах менять его геометрические свойства. Исследованы оптические свойства такого нейтроновода, определены зависимости пропускающей способности от расходимости и спектра пучка, высоты и ширины подводящего нейтроновода. Сделан вывод о схожести свойств винтообразного нейтроновода с изогнутым.

Впервые разработан нейтроновод-трансформер восьмиугольного сечения. На основании профиля расходимости пучка на выходе нейтроновода-трансформера сделан вывод о схожести оптических свойств восьмиугольного нейтроновода с баллистическим. Найдена геометрия, обеспечивающая высокую пропускающую способность восьмиугольного нейтроновода.

Научная и практическая значимость

Эксперименты с использованием нейтронного рассеяния в большинстве случаев сопряжены с трудностями, вызванными низкой плотностью потока на образце. В настоящее время проблема низкой светосилы нейтронных приборов усугубляется следующими тенденциями:

 Характерный размер исследуемых образцов постоянно уменьшается, новые синтезируемые вещества зачастую невозможно получить в достаточном объеме. Разрыв в доступных размерах образцов между нейтронными и синхротронными методиками может привести к потере комплементарности между ними.

- 2. Растет востребованность параметрических исследований, что требует уменьшения времени измерения каждого отдельного состояния образца.
- 3. Набирают популярность исследования кинетики образцов, требующие наблюдения изменения его структуры в «реальном» времени.

Эти факторы определяют необходимость дальнейшего совершенствования нейтронного приборостроения и демонстрируют научную и практическую значимость работ по оптимизации нейтронной оптики для создаваемых станций на реакторе ПИК с целью повышения их светосилы.

Апробация работы

Результаты работы многократно представлялись на семинарах кафедры ядернофизических методов исследования физического факультета Санкт-Петербургского Государственного Университета и отдела исследования конденсированного состояния Петербургского Института Ядерной Физики, на совещаниях проекта PIK-GGBase (перевозка и модернизация нейтронных станций из Центра Гельмгольца в Геестахте, HZG, на реактор ПИК) и заседаниях международных рекомендательных подкомитетов NSAC по разработке приборной базы реактора ПИК. Результаты также представлялись на Зимних школах ПИЯФ (2013-2017 гг.), сериях совещаний Муромец и Спектрина, а также на всероссийских и международных конференциях: European Conference on Neutron Scattering ECNS2019 (Санкт-Петербург, Россия, 2019); Конференция по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2018 (Санкт-Петербург, Россия, 2018); International Conference on Neutron Scattering ICNS2017 (Тэджон, Южная Корея, 2017); International Collaboration on Advanced Neutron Sources ICANS XXII (Оксфорд, Великобритания, 2017); International Conference on Polarised Neutrons for Condensed Matter Investigations PNCMI2016 (Мюнхен, Германия, 2016); Design and Engineering of Neutron Instruments Meeting DENIM2015 (Будапешт, Венгрия, 2015); JCNS Workshop 2014 (Тутцинг, Германия, 2014); Совещание по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах РНСИ-КС-2014 (Санкт-Петербург, Россия, 2014); McStas school (Берлин, Германия, 2013).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 22 работы, из них 16 тезисов докладов и 6 работ в рецензируемых журналах, входящих в список ВАК:

A1. Pleshanov N. K., **Konik P. I.**, Matveev V. A. Neutron fan beam reflectometry // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – T. 896. – C. 43–52.

А2. Павлов, К. А., **Коник, П. И.**, Сыромятников, В. Г., Григорьев, С. В., Москвин, Е. В. Численное моделирование поляризатора для установки малоуглового рассеяния нейтронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – №. 11. – С. 82–90.

АЗ. Щебетов, А. Ф., Гордеев, Г. П., Лазебник, И. М., **Коник, П. И.**, Диденко, Г. П., Забенкин, В. Н., Аксельрод, Л. А. Формирователь нейтронного пучка для рефлектометра Реверанс с вертикальной плоскостью рассеяния //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2017. – №. 10. – С. 3–10.

A4. Pavlov, K. A., Konik, P. I., Syromyatnikov, V. G., Grigoriev, S. V., Moskvin, E. V. Optimization of a polarizer device for SANS-2 instrument at the PIK reactor // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – T. $862. - N^{\circ}$. 1. – C. 012–020.

A5. Konik P. I., Moskvin E. V. Ways of upgrading the neutron guide system of the PIK reactor // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. $-2015. - T. 9. - N^{\circ}. 6. - C. 1121-1125.$

A6. Konik P., Grigoriev S., Moskvin E. Neutron guide optimisation for monochromatic reflectometry // Journal of Neutron Research. – 2015. – T. 18. – №. 4. – C. 117–126.

Положения, выносимые на защиту

 Характеристики нейтроноводной системы реактора ПИК, установленные в ходе численного моделирования и процедуры оптимизации, такие как сечения, начальные углы и радиусы кривизны нейтроноводов, точки ветвления, покрытия поверхности, формы концентраторов и трансформера пучка, обеспечивают требуемые нейтронные потоки порядка 10⁹–10¹⁰ н/с/см² на образцах нейтронных инструментов физики конденсированного состояния, а именно установок малоуглового рассеяния нейтронов для исследования нанообъектов, нейтронных рефлектометров для изучения поверхностей и нейтронных спектрометров для измерения динамических характеристик материалов.

- 2. В качестве общего подхода к многопараметрической задаче разработки нейтроноводной системы предложена поэтапная процедура. На первом шаге создается пространственная модель расстановки всех инструментов на одном реакторном канале, учитывающая принципиальную геометрию рассеяния различных инструментов и схожие требования к сечению и спектру нейтронного пучка при минимизации потерь. На втором шаге с использованием методов численного моделирования отражающей нейтронной оптики определяются геометрические параметры нейтроноводов.
- 3. Для каждого нейтроновода реализован принцип индивидуальной оптимизации под нужды конкретных методик исследования свойств конденсированного вещества с учетом их требований к нейтронному пучку. Для монохроматических рефлектометров и трехосных спектрометров, использующих фокусировку кристаллическим монохроматором, используются нейтроноводы постоянного сечения. Для времяпролетных рефлектометров и спектрометров показано, что эллиптические нейтроноводы в условиях больших замедлителей имеют пропускающую способность сравнимую с нейтроноводами постоянного сечения, снабженными концентраторами. Для установок малоуглового рассеяния нейтронов, использующих коллимированные пучки, применяется ветвление нейтроноводов с целью умножения числа конечных позиций, при этом использование суперзеркального покрытия нейтроноводов не приводит к увеличению потоков нейтронов на образце, но приводит к повышению фона.
- 4. Для исследования жидкости путем отражения нейтронов с вертикальной плоскостью рассеяния при ограниченной начальной ширине оптического тракта необходимо использовать нейтроноводы-трансформеры пучка. Винтообразный нейтроновод имеет оптические свойства схожие с изогнутым нейтроноводом и обеспечивает высокую эффективность трансформации пучка при повороте его оси на 90°. Восьмиугольный нейтроновод име-

ет оптические свойства схожие с баллистическим нейтроноводом и обеспечивает сравнимое пропускание. Использование восьмиугольного нейтроновода предпочтительно с технологической точки зрения.

Личный вклад автора

Личный вклад соискателя заключается в формулировке основных идей, развитых в диссертации, постановке задач, в планировании и выполнении нейтроннооптических расчетов. Все результаты диссертационной работы получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Работа выполнена на базе НИЦ «Курчатовский Институт» — ПИЯФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 118 страниц, 49 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает 99 наименований.

Первая глава носит обзорный характер. Рассмотрены физические основы работы нейтронных зеркал. Проанализированы различные виды нейтроноводов и их особенности. Показана важность оптимизации нейтронной оптики для достижения высокой эффективности работы нейтронных станций физики конденсированного состояния. Выявлены основные тенденции развития нейтроноводов и нейтроноводных систем.

Вторая глава содержит информацию об используемой в диссертации методике нейтронных расчетов. Описан программный пакет McStas и продемонстрирована верификация моделей, созданных автором диссертации.

В третьей главе рассматриваются различные вопросы, решение которых необходимо перед началом непосредственной разработки нейтроноводной системы реактора ПИК. Предложен общий пошаговый подход к проектированию нейтроноводных систем. Для инструментов, использующих кристаллические монохроматоры, проведено сравнение различных геометрий нейтроноводов и сделан вывод об эффективности нейтроновода постоянного сечения. Проанализирована эффективность применения баллистических нейтроноводов в условиях большого замедлителя. Показано, что в этом случае нейтроноводы, снабженные концентраторами, являются оптимальным выбором. Для рефлектометра с вертикальной плоскостью рассеяния рассмотрены два варианта нейтроноводатрансформера, винтообразный и восьмиугольный, определена их эффективность по сравнению с эталонным нейтроноводом постоянного сечения. Сделан вывод о предпочтительности использования восьмиугольного нейтроновода. С помощью численного моделирования проанализированы различные факторы потерь в нейтроноводах. Выявлены наиболее важные среди них: сниженная отражательная способность зеркал, волнистость и ошибки юстировки. Сформулирован принцип расстановки инструментов, способствующий снижению потерь. Результаты, полученные в этой главе, носят универсальный характер, и могут быть использованы при решении нейтронно-оптических задач на любом нейтронном источнике.

В четвертой главе описывается разработанная конфигурация нейтроноводной системы реактора ПИК. Дано описание создаваемой приборной базы и определены предпочтительные виды нейтроноводов для каждого инструмента. Определена расстановка приборов в нейтроноводном зале и группировка индивидуальных нейтроноводов на реакторном канале. Для каждого нейтроновода найдены радиус кривизны, точки ветвления, характеристики покрытия стенок, также определены оптимальные геометрические параметры концентраторов. Проведено сравнение нейтронных потоков на образцах установок реактора ПИК с зарубежными аналогами. Показана высокая эффективность предложенной конфигурации нейтроноводной системы реактора ПИК. Намечены пути дальнейших исследований, базирующихся на полученных результатах.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Глава 1

Нейтроноводы

1.1 Нейтронные зеркала

Полное внешнее отражение

Нейтрон, как и всякая другая частица, проявляет волновые свойства. При рассеянии нейтронов наблюдаются такие явления, как дифракция и интерференция, и оказывается возможным и удобным описывать движение нейтрона (распространение нейтронной волны) в терминах, аналогичных классической оптике.

Рассмотрим границу вакуума и среды. При падении на нее нейтрона из вакуума происходят преломление и отражение. На основе волнового представления нейтрона можно показать, пренебрегая поглощением, а также неупругим и некогерентным рассеянием, что коэффициент преломления n для нейтрона имеет вид [1]:

$$n = 1 - \frac{\lambda^2}{2\pi} N b_{coh},\tag{1.1}$$

где λ — длина волны нейтрона, N — атомная плотность вещества, а b_{coh} — когерентная длина рассеяния вещества. Последняя величина определяет характер взаимодействия нейтрона с системой ядер вещества как с целым. При наличии в веществе *S* типов атомов формула приобретает вид:

$$n = 1 - \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{i=1}^{S} N_i b_{cohi}, \qquad (1.2)$$

Для большинства материалов коэффициент преломления нейтронов оказывается меньше единицы.

В классической оптике известно явление полного внутреннего отражения. В случае нейтронов наблюдается аналогичное явление, но, так как n < 1, оно носит характер полного внешнего отражения (ПВО). При падении волны из вакуума на границу среды под скользящим углом θ_i верно соотношение

$$\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_t} = n,\tag{1.3}$$

где θ_t — угол между преломленным лучом и границей среды. Критическим углом материала θ_c называют такой θ_i , при котором $\theta_t = 0$. В таком случае

$$\cos \theta_c = n. \tag{1.4}$$

Как будет показано ниже, справедливо считать θ_c малым. Учитывая этот факт, а также уравнения (1.1) и (1.4), имеем

$$1 - \frac{\theta_c^2}{2} = 1 - \frac{\lambda^2}{2\pi} N b_{coh}$$
 (1.5)

$$\theta_c = \lambda \sqrt{\frac{Nb_{coh}}{\pi}} \tag{1.6}$$

Иногда используются производные величины: критический переданный импульс Q_c

$$Q_c = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta_c = 4\sqrt{\pi N b_{coh}} \tag{1.7}$$

и граничная длина волны λ_c

$$\lambda_c = \frac{\lambda}{\theta_c} = \sqrt{\frac{\pi}{Nb_{coh}}}.$$
(1.8)

При $\theta_i \leq \theta_c$ отражение будет происходить с коэффициентом $R \approx 1$. Для углов $\theta_i > \theta_c$ кривая отражательной способности (рефлективности) быстро спадает по закону $R \sim Q^{-4}$ [1]. Этот эффект лежит в основе использования тонких пленок на твердой подложке в качестве нейтронных зеркал.

Материал	P, Γ/cm^3	M,г $/$ моль	<i>b_{coh}</i> , фм	$ heta_c/\lambda,{}^{\circ}/{ m \AA}$
Ni	8.902	58.693	10.3	0.099
Cu	8.92	63.546	7.71	0.083
⁵⁸ Ni	8.902	57.935	14.4	0.118
алмаз (С)	3.5	12.01	6.646	0.110
кварц (SiO_2)	2.6	60.065	15.7551	0.065
Al	2.699	26.982	3.449	0.046
Si	2.33	28.085	4.1491	0.046
Ti	4.54	47.867	-3.438	_

Таблица 1.1. Нейтронно-оптические характеристики некоторых материалов [2]. Здесь Р — плотность, *М* — молярная масса.

Табл. 1.1 дает представление о величине критического угла для некоторых часто используемых материалов. Вопреки распространенному мнению, наибольшим критическим углом среди всех природных материалов обладает, по-видимому, алмаз. Тем не менее, благодаря совокупности таких параметров, как цена, доступность и технологичность, самым распространенным материалом для нейтронных зеркал стал никель. Наибольшим критическим углом среди всех однородных материалов обладает изотоп ⁵⁸Ni.

При отражении под столь малыми углами, как указанные в табл. 1.1, нейтроны проникают в среду на глубину порядка тысяч ангстрем. По этой причине для создания нейтронного зеркала достаточно нанести на подложку лишь относительно тонкий отражающий слой. Материал подложки выбирается из таких технических соображений как: стойкость к тепловым и радиационным нагрузкам, механическая прочность, простота полировки, возможность адгезии наносимого покрытия к подложке. Чаще всего используются борированное стекло, в отдельных случаях — безборное стекло, алюминий, кремний и другие материалы.

Суперзеркала

Во множестве случаев критический угол, а значит и захватываемая нейтроноводов апертура, напрямую влияет на эффективность нейтронного прибора. Для достижения критических углов больших, чем у никеля, используются апериодические многослойные структуры, называемые суперзеркалами. Рассмотрим для начала многослойную структуру с периодом *d*. В сравнении с рассматривавшейся ранее границей двух сред, такая структура имеет более сложную кривую отражательной способности: дополнительно к области полного внешнего отражения на ней присутствует брэгговский пик, соответствующий периоду *d*. С практической точки зрения дифракционные максимумы высших порядков имеют пренебрежимо малую интенсивность.

В случае структуры с плавно меняющимся периодом многочисленные брэгговские пики сольются, а коэффициент отражения *R* будет приблизительно линейно зависеть от угла отражения (см. рис. 1.1). Эту область кривой отражательной способности называют суперзеркальной. Впервые идея создания суперзеркал была высказана в 1967 г. в работе [3], а вскоре последовала практическая реализация [4–7].



Рис. 1.1. Кривые отражательной способности для суперзеркал фирмы Swiss Neutronics с различными m [8].

Суперзеркала в первую очередь характеризуются числом m, которое равно отношению критического угла суперзеркала к критическому углу природного никеля. Второй важной характеристикой является коэффициент отражения R_m на срезе, то есть при угле отражения равном $m\theta_c$. На 2018 год суперзеркала могут достигать значений m = 8 и $R_m = 0.4$ (см. рис. 1.1) [8].

Наиболее подходящими материалами для создания суперзеркал являются те, которые обладают максимальным нейтронным контрастом, то есть наибольшей разницей Nb_{coh} . На сегодня широко распространены зеркала на основе пары Ni/Ti (см. табл. 1.1).

1.2 Нейтроноводы постоянного сечения

1.2.1 Прямые нейтроноводы

Несмотря на то, что явление ПВО было хорошо известно с самого начала экспериментальных работ с нейтронным излучением, нейтроноводы были изобретены фактически случайно [9]. В конце 1950-х годов в одном из экспериментов на канале реактора FRM (Мюнхен, Западная Германия) нейтроны проходили по воздуху несколько метров. Для того, чтобы исключить воздействие нейтронов на проходящих мимо людей, пучок был заключен в латунную трубу. Поток на выходе этой трубы значительно вырос! Вскоре был сконструирован первый настоящий нейтроновод [10] — зеркальный канал, пригодный для транспортировки нейтронов на расстояния порядка многих десятков метров. На рис. 1.2 приведена фотография современной нейтроноводной секции для трех нейтронных пучков без вакуумного кожуха.



Рис. 1.2. Внешний вид нейтроноводной секции производства фирмы SwissNeutronics.

Эксперименты с использованием нейтроноводов получили быстрое распространение (около 10 лет от изобретения до создания первой масштабной нейтроноводной системы) благодаря ряду преимуществ по сравнению с экспериментами непосредственно на реакторных каналах [11]:

- 1. экспериментальные установки можно располагать на значительном удалении от реактора в низкофоновых условиях;
- 2. возникает возможность размещать несколько установок на одном пучке или использовать габаритное оборудование;
- 3. становится возможным использование больших пролетных баз для экспериментов, требующих высокого разрешения по времени пролета;
- нейтроновод может выступать в роли формирователя пучка, отсекая нежелательные части спектра, определяя сечение и расходимость пучка на образце.

Изначально преимущества нейтроноводов особенно ярко проявлялись при экспериментах с холодными нейтронами, но к настоящему времени они широко применяются при работе со всем спектральным диапазоном благодаря прогрессу суперзеркальной технологии [8].

Грубо оценить выигрыш G при применении нейтроновода возможно сравнив захватываемую им апертуру (телесный угол) Ω_G с апертурой Ω_C на выходе незеркального канала тех же длины L и сечения $w \times h$:

$$G = \frac{\Omega_G}{\Omega_C} = \frac{\Omega_G L^2}{wh}.$$
(1.9)

Для никелевого нейтроновода сечением 30×30 мм² и длиной 30 м для длины волны $\lambda = 5$ Å выигрыш составит $G \approx 17500$.

Важно понимать, что нейтроноводы, как и любые другие оптические устройства, действуют на нейтронный пучок согласно теореме Лиувилля о сохранении фазового объема [12]. При прохождении нейтронов по зеркальному каналу сохраняется величина *B*, называемая яркостью и определяемая как

$$B = \frac{d^2 I}{dS d\Omega},\tag{1.10}$$

где I — интенсивность (поток), S — площадь, Ω — апертура пучка. Яркость обычно измеряется в единицах н/с/см²/ср. В действительности пропускная способность по яркости η , определяемая как отношение яркостей на выходе и входе нейтроновода, всегда заметно меньше 100% (см., напр., [13]), что связано как с геометрией нейтроновода, так и значением R_m при использовании суперзеркал, а также с возможными потерями.

Другая важная величина, часто используемая при описании нейтроноводов, — плотность потока Ф, определяемая как

$$\Phi = \frac{dI}{dS}.\tag{1.11}$$

Плотность потока обычно приводят либо на выходе нейтроновода, либо на позиции образца и измеряют в н/с/см².

1.2.2 Освещенность

На практике невозможно подвести нейтронную оптику вплотную к поверхности замедлителя. Нейтроноводы устанавливают обычно на расстоянии 1.5–2 м от светящейся поверхности для избежания тепловых или радиационных повреждений. С учетом конечных размеров замедлителя это приводит к проблеме недоосвещенности: видимый из нейтроновода угловой размер замедлителя оказывается меньше, чем возможная апертура захвата нейтроновода.

На рис. 1.3 продемонстрированы последствия этого явления. Во-первых, недоосвещенность заметно снижает потенциальный выигрыш от использования нейтроновода, что особенно заметно на больших длинах волн. Во-вторых, возникает неоднородность в фазовом объеме пучка, которая может оказывать влияние на функцию разрешения прибора, установленного на данный нейтроновод. Подробное рассмотрение различных случаев недоосвещенности в зависимости от геометрии нейтроновода приведено в работе [14].

Заметим, что, вообще говоря, любой разрыв нейтроновода провоцирует появление аналогичной картины фазового объема пучка, но наиболее широким и важным разрывом обычно является самый первый, а именно — между источником и началом оптики.

1.2.3 Потери

К основным причинам потерь в реальных нейтроноводах можно отнести [11, 15, 16]:



Рис. 1.3. Фазовые диаграммы на выходах полностью освещенного и недоосвещенного нейтроноводов. Здесь x — поперечная координата на выходе нейтроновода, а dx — расходимость пучка.

- Рефлективность зеркал R < 1, что вызывается микроструктурой поверхности. Этот фактор тем заметнее, чем больше число соударений, поэтому он в основном влияет на сильно расходящиеся пучки холодных нейтронов. Современное типичное значение рефлективности в режиме ПВО R₀ ≈ 0.99, рефлективность в суперзеркальном режиме приведена на рис. 1.1. Качество отражающего покрытия вблизи источника может снижаться со временем из-за тепловой и радиационной нагрузок.
- 2. Волнистость зеркал, которая может привести к выходу нейтронной траектории на закритические углы падения. Потери по этой причине сосредоточены в тепловой части спектра, где нейтроновод полностью освещен, так как в этой ситуации любое увеличение угла падения приведет к поглощению нейтрона. Эффективным способом уменьшения потерь, связанных с волнистостью, является незначительное увеличение критического угла суперзеркала. Современные зеркала имеют волнистость порядка

 $\eta \approx 1.5 - 4 \times 10^{-4}$ рад в зависимости от подложки. Для оценки потерь угловые разъюстировки нейтроноводных секций могут приравниваться к волнистости.

3. Линейные смещения секций приводят к независимым от длины волны потерям и имеют тенденцию накапливаться со временем, в том числе из-за движения грунта. Их влияние особо значимо для нейтроноводов имеющих малое сечение. Современная точность начальной юстировки секций достигает 0.02 мм.

1.3 Изогнутые нейтроноводы

1.3.1 Уход с прямой видимости

Использование изогнутых нейтроноводов было предложено уже в пионерской работе [17], где также были получены основные формулы, описывающие поведение нейтронов в них. Такие нейтроноводы обеспечивают уход с прямой видимости источника и резко снижают фон гамма-квантов и быстрых нейтронов.

На рис. 1.4 схематично изображен изогнутый по окружности радиусом ρ нейтроновод шириной w. Левую по ходу движения нейтронов стенку будем называть вогнутой, или внешней, а правую — выпуклой, или внутренней.

Уход с прямой видимости осуществляется при длине L_{LoS}

$$L_{LoS} = \sqrt{8w\rho}.\tag{1.12}$$

Это выражение модифицируется, если есть начальная прямая секция длиной L_S [18]:

$$L_{LoS} = \frac{\sqrt{8w\rho}}{2} + \sqrt{L_S^2 + 2w\rho} - L_S.$$
(1.13)

На практике длину изогнутого нейтроновода L подбирают с некоторым коэффициентом запаса k:

$$L = k L_{LoS}. \tag{1.14}$$

На источниках реакторного типа коэффициент k обычно выбирают в пределах



Рис. 1.4. Изогнутый нейтроновод. Цветом показаны два типа траекторий нейтронов: зеленым — гирляндные, синим — зигзагообразные.

k = 1.1 - 1.2.

В некоторых случаях геометрические ограничения не позволяют использовать изогнутые нейтроноводы. В таких условиях применяются многоканальные изогнутые нейтроноводы — бендеры [19]. Каждый узкий канал бендера подчиняется тем же соотношениям, что и обычный изогнутый нейтроновод. Интенсивность на выходе бендера несколько ниже, чем у обычного изогнутого нейтроновода по двум основным причинам: во-первых, конечная толщина стенок между каналами снижает полезное сечение нейтроновода, во-вторых, волнистость и прочие дефекты поверхности многочисленных стенок уменьшают пропускную способность бендера.

Уход с прямой видимости не единственная задача, решаемая с помощью изогнутых нейтроноводов. Их применение также упрощает разведение пучков по установкам и, например, может использоваться для изменения вертикального угла падения на образец, что может быть полезно для рефлектометров с горизонтальной плоскостью образца [20].

1.3.2 Пропускающая способность

Из круговой геометрии изогнутого нейтроновода следует выражение

$$\theta^2 = \theta_a^2 - \frac{2x}{\rho},\tag{1.15}$$

где θ — начальный угол нейтронной траектории к оси нейтроновода, θ_a — угол отражения от внешней стенки, а x — максимальное удаление траектории от стенки.

Для расчета максимальной расходимости θ_{max} , которую может пропустить нейтроновод, примем $\theta_a = \theta_c$. Введем характерный угол нейтроновода θ_* , определяемый как

$$\theta_* = \frac{2w}{\rho}.\tag{1.16}$$

Нейтроны с $\theta < \theta_*$ никогда не достигают внутренней стенки нейтроновода и движутся по нему гирляндно. Нейтроны с $\theta > \theta_*$ могут ударяться об обе стенки и движутся по нейтроноводу зигзагообразно. На рис. 1.5 показана диаграмма, демонстрирующая распределение нейтронов различных расходимостей по по-перечной координате внутри нейтроновода.

Величина T, определяемая как площадь под графиком на рис. 1.5,

$$T = \frac{1}{a\theta_c} \int_0^{\min(\frac{\theta_a^2 \rho}{2}, w)} \theta dx = \frac{1}{a} \int_0^{\min(\frac{\theta_a^2 \rho}{2}, w)} \sqrt{1 - \frac{2x}{\rho\theta_c}} dx, \qquad (1.17)$$

называется трансмиссией изогнутого нейтроновода, или его коэффициентом заполнения, и соответствует отношению интенсивности на выходе изогнутого нейтроновода к интенсивности на выходе прямого при тех же длине и сечении.

Для заданного отражающего покрытия внешней стенки нейтроновода характерному углу θ_* соответствует характерная длина волны λ_* :

$$\lambda_* = \lambda_c \theta_*. \tag{1.18}$$

На рис. 1.6 изображена трансмиссия изогнутого нейтроновода в зависимости от длины волны λ . Трансмиссия при $\lambda = \lambda_*$ составляет T = 2/3.



Рис. 1.5. Максимальная пропускаемая расходимость в зависимости от координаты. Нейтроны с $\theta < \theta_*$ никогда не достигают внутренней стенки нейтроновода. Нейтроны с $\theta > \theta_*$ могут ударяться об обе стенки. Пунктиром показано распределение нейтронов на выходе прямого нейтроновода. Дополнительно показаны значения трансмиссии в соответствующих случаях.



Рис. 1.6. Трансмиссия изогнутого нейтроновода в зависимости от длины волны λ . При $\lambda = \lambda_*$ трансмиссия составляет T = 2/3.

1.3.3 Однородность пучка

Переходя от угловых переменных к длинам волн на основе уравнения (1.18), можно сказать, что нейтроны достаточно больших длин волн испытывают в основном зигзагообразные столкновения и имеют довольно однородное распределение как по поперечной координате, так и по углу на выходе нейтроновода. Коротковолновые нейтроны, напротив, испытывают гирляндные отражения и «прижимаются» к внешней стенке нейтроновода.

Многие эксперименты по нейтронному рассеянию требуют однородных как пространственного, так и углового распределений нейтронов в пучке.

Одним из возможных решений этой проблемы является использование прямой секции нейтроновода после изогнутой. Как показано в работах [21,22], при одинаковом покрытии всех стенок изогнутого нейтроновода асимметрия пространственного распределения интенсивности ведет себя как поперечная волна, постепенно затухающая с длиной прямого нейтроновода, установленного после изогнутого, и тем быстрее, чем больше длина волны. Однако неоднородность в угловом распределении сохраняется вне зависимости от длины прямой секции.

Угол скольжения для внутренней стенки изогнутого нейтроновода оказываются больше, чем для внешней, что значит, что вход в прямую секцию всегда неравномерно освещен. В работах [23,24] рассмотрен изогнутый нейтроновод с увеличенным покрытием *m* на внешней стенке и показано, что в таком случае возможно добиться однородных и пространственного, и углового распределений для заданного диапазона длин волн.

Другой способ избежать асимметрии распределения заключается в использовании дважды изогнутого, или S-образного, нейтроновода. Нейтроны, двигавшиеся по гирляндным траекториям в первой части нейтроновода, попадают на стенки второй части под слишком большим углом и поглощаются. Таким образом, до конца нейтроновода доходят лишь нейтроны, испытывающие зигзагообразные отражения, а им присуще достаточно однородное распределение по сечению и углу. Дополнительными эффектами в этом случае является гораздо лучшая фильтрация коротковолновых нейтронов [25] и возможность изменения высоты пучка для нужд установки [26].

1.4 Нейтроноводы переменного сечения

1.4.1 Фокусирующие устройства

С конца 80-х годов прошлого века все большее распространение получают суперзеркальные нейтроноводы [20, 27–29]. Увеличение критического угла позволяет, во-первых, увеличить захватываемый телесный угол, а во-вторых, транспортировать больше коротковолновых нейтронов.

К недостаткам суперзеркальных нейтроноводов относится сниженная отражательная способность на больших углах (см. рис. 1.1), что ведет к серьезным потерям нейтронного потока. Несмотря на это, применение суперзеркал оказывается эффективным на относительно небольших дистанциях или в фокусирующих устройствах (концентраторах). Стенки таких устройств могут сходиться линейно [30,31], но чаще им придается форма параболы или эллипса [32–37]. Эти кривые второго порядка обладают следующими оптическими свойствами. Если поместить точечный источник излучения в один из фокусов эллипса, то после одного отражения все лучи соберутся вновь во втором фокусе. Если же разместить источник в фокусе параболы, то после одного отражения пучок станет идеально сколлимирован, и наоборот, падающий по оси параболы коллимированный пучок сфокусируется в точку. Преимущество эллиптических и параболических «носов» над линейно сходящимися стенками состоит в том, что плотность потока нейтронов продолжает возрастать между выходом из нейтроновода и точкой фокуса. Во-первых, это облегчает использование различного окружения образца, во-вторых, изменяя фокусное расстояние путем добавления или снятия отдельных секций нейтроновода, возможно менять интенсивность на образце и разрешение установки [38].

Использование фокусирующих устройств в конце нейтроновода оказывается очень выгодно для приборов, использующих фокусирующие монохроматоры в недисперсионной геометрии. Эффективность установки значительно возрастает, если перед монохроматором с помощью фокусирующего нейтроновода сформирован виртуальный точечный источник [33, 39, 40].

Другое применение эллиптические или параболические «носы» находят на времяпролетных спектрометрах. Фокусируя пучок на окнах дисковых прерывателей, можно добиться уменьшения длительности нейтронной вспышки и, следовательно, улучшения разрешения [38,41].

1.4.2 Баллистические нейтроноводы

Для повышения эффективности использования суперзеркал, а также для снижения потерь при использовании больших времяпролетных баз необходимо радикально снизить количество отражений нейтронов от стенок нейтроновода. Это оказывается возможным при использовании баллистических нейтроноводов. Принципиальный вид такого нейтроновода представлен на рис. 1.7.

На первом участке такого нейтроновода происходит увеличение сечения канала, что имеет двоякий эффект. Во-первых, количество соударений нейтронов о стенки уменьшается обратно пропорционально увеличению ширины нейтроновода. Во-вторых, при соударениях с расходящимися стенками уменьшается расходимость нейтронного пучка, что также пропорционально уменьшает количество соударений. Таким образом, верно следующее соотношение:

$$\frac{n}{n_0} = \left(\frac{x_0}{x}\right)^2,\tag{1.19}$$

где n и n_0 — количество соударений в баллистическом и обычном нейтроноводах, а x и x_0 — ширины центральной части баллистического и обычного нейтроноводов.

Вторым элементом следует длинная секция постоянного сечения, в которой нейтроны движутся почти без соударений, то есть «баллистически». Заканчивается нейтроновод сходящейся секцией, покрытой, как и расходящаяся, суперзеркальным покрытием.

Первый такой нейтроновод был создан в Институте Лауэ-Ланежевена (ILL, Гренобль, Франция) в 2001 году и показал свою высокую эффективность: интенсивность пучка выросла приблизительно в 2 раза по сравнению с нейтроноводом постоянного сечения [42, 43]. Другие примеры подобных нейтроноводов описаны в работах [44, 45].



Рис. 1.7. Общий вид баллистического, параболического и эллиптического ней-троноводов.

1.4.3 Эллиптические и параболические нейтроноводы

Наибольшей эффективности транспорта нейтронов можно достигнуть при использовании баллистического нейтроновода, у которого начальная и конечная секция заменены на параболические или эллиптические «носы», или вовсе полностью эллиптического нейтроновода [13, 39, 41, 46, 47] (см. рис. 1.7).

Расходимость нейтронного пучка внутри эллиптических и параболических нейтроноводов плавно падает до их середины, а затем снова растет, как и в обычных баллистических. Это позволяет использовать покрытие с высоким *m* лишь на начальных и конечных секциях нейтроновода.

Определенную проблему для эллиптических нейтроноводов представляет уход с прямой видимости источника. Если изогнуть такой нейтроновод, будут потеряны оптические свойства эллипса и существенно снизится эффективность транспорта нейтронов. Такой способ нежелателен, хотя в принципе и возможен для очень длинных нейтроноводов [47]. Предлагались использование поглоща-

29

ющих ловушек на оси нейтроновода [38], а также интересное решение с гравитационным искривлением нейтроновода, эффективное лишь на больших дистанциях [48]. Параболический нейтроновод лишен подобной проблемы, так как центральная его часть имеет параллельные стенки и может быть изогнута.

В действительности источник нейтронов, особенно на стационарных реакторах, имеет значительные размеры, что отрицательно сказывается на эффективности как параболических, так и эллиптических нейтроноводов. Для параболических становится заметна неоднородность доставленного фазового пространства (как и для обычных баллистических): в угловом распределении потока появляются дополнительные пики и провалы [49]. Для эллиптических характерна кома, один из видов аберраций. Для борьбы с ней предлагалось использовать четное число последовательных эллиптических нейтроноводов, что также решает проблему ухода с прямой видимости [50, 51], или гибридную схему, где половина нейтроновода имеет форму эллипса, а половина — параболы [52]. Наконец, неточечный размер источника ведет к тому, что наиболее вероятное число отражений в эллиптическом нейтроноводе оказывается больше одного [53].

В качестве итога приведем сравнительную таблицу эффективности различных типов нейтроноводов из работы [54] (табл. 1.2). В ней рассматривались оптимизированные нейтроноводы различных длин для тепловых и холодных нейтронов с низкой или высокой расходимостью. Хорошо видно, что баллистические нейтроноводы не являются оптимальными ни в одном из случаев. Эллиптические и параболические нейтроноводы показывают примерно одинаковую эффективность и имеют преимущество перед прочими типами в следующих случаях: при использовании тепловых нейтронов, при необходимости сохранения высокой расходимости пучков и при транспорте нейтронов на большие дистанции. В то же время нейтроноводы постоянного сечения показывают приемлемые результаты в остальных случаях. Отметим, что окончательный выбор между параболическим и эллиптическим нейтроноводом должен делаться в каждом случае отдельно и сильно зависит от всех входных данных.

<i>L</i> , м	dx, \circ	λ	Е	Р	В	S
50	0.5	Т	1.84	1.87	1.79	1.00
50	0.5	C	0.97	1.03	1.05	1.00
50	2	Т	9.50	8.29	4.97	1.00
50	2	C	5.03	5.34	3.79	1.00
100	0.5	Т	2.39	2.45	2.21	1.00
100	0.5	C	1.09	1.08	1.07	1.00
100	2	Т	14.56	12.24	6.32	1.00
100	2	C	6.85	6.51	5.04	1.00
150	0.5	Т	2.95	3.05	2.59	1.00
150	0.5	C	1.11	1.10	1.09	1.00
150	2	T	20.03	18.14	7.18	1.00
150	2	C	8.35	8.00	5.92	1.00

Таблица 1.2. Эффективность различных типов нейтроноводов. За эталон взят нейтроновод постоянного сечения. Здесь L — длина нейтроновода, dx — расходимость, λ — спектр, где T обозначены тепловые нейтроны, а C — холодные. Латинскими буквами обозначены типы нейтроноводов: Е — эллиптический, Р — параболический, В — баллистический, S — постоянного сечения.

1.5 Нейтроноводы-трансформеры

Различным нейтронным инструментам требуются существенно разные пучки. Особо выделяются рефлектометры с образцами, расположенными в горизонтальной плоскости. Такие приборы требуют широкого пучка небольшой высоты с высокой горизонтальной расходимостью и низкой вертикальной расходимостью, что противоположно тому, что можно найти на обычном реакторном канале, особенно при ограничениях со стороны соседних нейтроноводов. Возникает необходимость разработки «трансформера», поворачивающего нейтронный пучок вокруг собственной оси на 90°. На сегодняшний день существует лишь один подобный нейтроновод, выполненный в форме винта [19].

Альтернативный подход к проблеме был предложен в докладе [55] и состоит в использовании восьмиугольного нейтроновода. Предлагается адиабатически изменять сечение нейтроновода от прямоугольного к восьмиугольному и назад к прямоугольному, при этом наклонные стенки обеспечивают «перекачку» расходимости пучка из вертикальной плоскости в горизонтальную. К настоящему моменту восьмиугольные нейтроноводы используются только для целей сглаживания пространственных неоднородностей пучков [41,56].

1.6 Нейтроноводные системы

1.6.1 Существующие системы

Будем называть нейтроноводной системой (HC) совокупность нейтроноводов, установленных на одном канале и налагающих взаимные ограничения на оптимизацию друг друга.

Практически каждый современный реактор, предназначенный для пучковых нейтронных исследований, снабжен нейтроноводной системой (или несколькими):

- HFR в ILL (Институт Лауэ-Ланжевена, Гренобль, Франция) [57–59] (три системы, первое крупномасштабное использование нейтроноводов);
- источник SINQ в PSI (Институт Пауля Шерера, Виллинген, Швейцария) [60] (первая система с широким применением суперзеркал);
- FRM-II (Мюнхен, Германия) [19, 26, 61, 62];
- OPAL в ANSTO (Сидней, Австралия) [63–65];
- BER-II в HZB (Центр Гельмгольца в Берлине, Германия) [66];
- реактор в NIST (Национальный Институт Стандартов и Технологий, Вашингтон, США) [67];
- реактор в HANARO (Тэджон, Южная Корея) [68];

и другие. Средняя НС питает около 10-15 инструментов.

К основным трудностям при создании новой HC следует отнести: согласование требований разнообразных нейтронных инструментов к пучкам в условиях ограниченного начального фазового объема; борьбу с ограниченным пространством, как для нейтроноводов, так и для самих инструментов.

Наблюдая за реконструкциями существующих и созданием новых HC в последние 10–15 лет, можно выделить следующие основные тенденции:

- Внедрение идеологии «один прибор один нейтроновод», что позволяет провести глубокую оптимизацию оптики под нужды конкретного инструмента. Ранее приборы, использующие монохроматоры, зачастую ставились один за другим на общем нейтроноводе, что вызывало потери на разрывах, мембранах, а также рассеяние на элементах монохроматора и ограничивало гибкость инструментов. Новый подход увеличивает светосилу и снижает фон, хотя и требует замены нейтроновода при замене инструмента;
- 2. Сокращение числа востребованных боковых позиций в пользу конечных позиций, что зачастую реализуется за счет ветвления нейтроноводов;
- 3. Стремление к максимальному использованию фазового объема пучка, выходящего из канала. Суперзеркала позволяют захватывают очень большие апертуры, которые могут быть не востребованы нейтронными инструментами. В таком случае используются расширяющиеся секции нейтроноводов, снижающие расходимость и увеличивающие сечение нейтроновода, что позволяет далее разделить его на несколько ветвей для отдельных инструментов.

Хорошим примером следования этим тенденциям является постепенная модернизация нейтроноводов в ILL, где в последние годы были достигнуты многократные выигрыши в светосиле на многих инструментах.

1.6.2 Проекты нейтроноводной системы реактора ПИК

Проектирование HC реактора ПИК имеет долгую историю. Первоначальный проект был создан еще в 1970–80-е годы и описан в работах [69, 70]. Эта система была аналогична современной на тот момент нейтроноводной системе в ILL.

В течение 1990-х и 2000-х годов происходило постепенное изменение проекта, которое заключалось главным образом в следующем:

1. Изменение кривизны отдельных нейтроноводов, что было вызвано изменениями приборной базы, а также миграцией утвержденных приборов по нейтроноводному залу и даже по каземату. 2. Развитие суперзеркальной технологии совместно с использованием бендеров позволило сократить длину ухода с прямой видимости и отказаться от создания мощной защиты в нейтроноводном зале.

Итогом этой эволюции стал проект, который далее мы будем называть вариант-2014, описанный в работе [71].

Вариант-2014, наряду с достоинствами, обладает рядом слабых мест.

Главной причиной несоответствия проекта современным требованиям является устаревшая идея о проектировании нейтроноводной системы в отрыве от нейтронных установок, в то время как оптимизацию нейтроноводов следует вести одновременно с проектированием приборов. Критерием оптимизации является не поток на выходе нейтроновода, а полезный поток на образце или детекторе.

Более детальное изучение варианта-2014 обнаруживает ряд конкретных существенных изъянов:

- Чертежи проекта содержат ошибку, связанную с начальным направлением нейтроноводов относительно оси канала ГЭК-3. Конфигурация приборов и все параметры нейтроноводов базируются на значении угла между строительной осью 20 здания 100А и осью нейтроноводного зала 4^o. На деле этот угол составляет 4^o28';
- 2. Проект не соответствует текущему состоянию приборной базы. В настоящее время (2019 год) активно разрабатываются приборы II очереди, что сопровождается изменением геометрических параметров приборов, а также изменением требований к пучку (сечение, расходимость, спектр). Невозможно одновременно создать согласованные нейтроноводную систему по варианту-2014 и актуальную приборную базу.
- В варианте-2014 практически не используются суперзеркала с m > 2 и фокусирующие устройства, значительно повышающие плотность потока на образцах установок нейтронного рассеяния.

1.7 Выводы

Нейтроноводы необходимы для транспортировки нейтронного потока на большие расстояния с небольшими потерями. Их применение позволило вынести приборы в отдельные экспериментальные залы, что привело к снижению фона и увеличению доступного пространства. Можно выделить следующие основные черты современных нейтроноводов:

- 1. Широкое использование суперзеркальных покрытий. В настоящее время суперзеркала производятся в массовых количествах, что способствует их удешевлению и дальнейшему распространению;
- 2. Поиск новых геометрических решений. Распространяются фокусирующие устройства, развиваются концепции различных типов баллистических нейтроноводов, включая эллиптические и параболические;
- Принцип «один прибор один нейтроновод». Каждый нейтроновод должен быть оптимизирован с учетом требований единственного инструмента установленного на нем. Иначе говоря, нейтроновод является составной неотъемлемой частью инструмента.

Хорошо оптимизированный нейтроновод обеспечивает высокую пропускную способность по яркости, задает необходимые для данного эксперимента параметры пучка и сохраняет низкий фон. Установки, использующие низкую расходимость (напр., малоугловые и рефлектометры в плоскости рассеяния) могут использовать нейтроноводы постоянного сечения, в то время как установки не требующие хорошего Q разрешения (напр., спектрометры и рефлектометры в плоскости нормальной к рассеянию) могут выиграть от использования эллиптических нейтроноводов или фокусирующих «носов».

Нейтроноводы реактора ПИК в варианте-2014 не соответствуют перечисленным выше требованиям. Цель данной работы — повышение эффективности работы инструментов нейтронного рассеяния для физики конденсированного состояния на реакторе ПИК путем разработки оптимальной конфигурации нейтроноводной системы. Глава 2

Методика

2.1 Методы расчета нейтроноводов

При создании нейтроноводов и нейтронных станций особое внимание уделяется предпроектным расчетам и глубокой оптимизации. Это объясняется как высокой стоимостью создаваемых изделий, так и относительно низкой светосилой нейтронных источников, которая вынуждает бороться даже за небольшие выигрыши в нейтронном потоке на образце.

Способы моделирования нейтронных станций условно можно разбить на три группы: аналитические, диаграммные и на основе метода Монте-Карло.

При аналитическом подходе интенсивность нейтронного пучка на выходе установки представляется произведением начальной интенсивности и функций пропускания каждого из элементов установки. При наличии большого числа оптических элементов в приборе результатом такого рассмотрения являются очень громоздкие выражения для интенсивности и разрешения, зачастую плохо поддающиеся анализу. Примерами использования аналитических методов для расчета нейтроноводов служат в основном работы 1960-х годов [17, 72, 73].

Очень эффективным для описания нейтроноводов оказалось применение диаграммной техники. Суть метода состоит в анализе проекции фазового пространства на плоскость, образованную двумя ортогональными базовыми векторами этого пространства. Для начала строят диаграмму, соответствующую входу рассчитываемого нейтроновода. Далее на ней отмечают возможные ограничения, создаваемые различными оптическими элементами системы, и отбрасывают или наносят новые области фазового пространства. Последовательно
проходя все части нейтроновода, можно получить довольно точную картину фазового пространства на его выходе. Диаграммный анализ успешно применялся при расчетах различных типов нейтроноводов, например, в работах [74–77]. Рост вычислительных мощностей позволил автоматизировать пошаговое построение диаграмм и значительно увеличить скорость такого анализа [78].

К недостаткам обоих методов относятся большое количество допущений и приближений, громоздкость вычислений, трудности учета различных видов ошибок и потерь. Их безусловное преимущество состоит в том, что только они дают подлинное понимание и объяснение наблюдаемых эффектов.

Альтернативным подходом к разработке нейтронных инструментов является комбинация методов трассировки лучей и Монте-Карло, чье широкое распространение стало возможным с развитием вычислительной техники. Из фазового объема, ограниченного соответствующими параметрами источника, случайным образом выбираются начальные траектории нейтронов. Далее они трассируются через всю оптическую систему, при необходимости их свойства вновь изменяются случайным образом (например, при дифракции на мозаичном кристалле). При условии достаточно большого количества траекторий и равномерной их выборки на выходе будет получено достоверное и точное описание нейтронного пучка.

Созданная таким методом модель может использоваться для решения различных задач:

- 1. Получение достоверной оценки нейтронного потока на выходе оптической системы;
- 2. Анализ распределения нейтронов по сечению и расходимости пучка, их спектра и поляризации;
- 3. Оптимизация параметров установки по заданному критерию (обычно максимальная светосила при некоторых условиях);
- 4. Проведение виртуальных экспериментов, облегчающих реальную работу экспериментаторов или использующихся в образовательных целях;
- Выяснение происхождения необъясненных эффектов при работе установки.

Использование метода Монте-Карло позволяет относительно легко моделировать сложные с точки зрения геометрии и содержащие большое число оптических элементов системы. Результаты симуляций представляются в наглядной и удобной для анализа форме.

2.2 Программный пакет McStas

2.2.1 Описание пакета

Исторически программные пакеты, реализующие метод Монте-Карло для нужд нейтронного рассеяния, создавались независимо во многих институтах, зачастую под конкретную задачу. К сегодняшнему дню наибольшее распространение получили NISP [79], IDEAS [80], RESTRAX [81], VITESS [82, 83] и McStas [84, 85], причем последние два отличаются универсальностью и могут применяться для моделирования большинства типов нейтронных установок. Все расчеты в данной работе выполнены с помощью пакета McStas, к чьим достоинствам также относятся отличная техническая поддержка, открытость исходного кода и удобный графический интерфейс.

Центральным элементом McStas является высокоуровневый язык программирования на основе языка C, использующийся для описания нейтронных установок. При запуске вычислений файл-описание транслируется на язык C и компилируется в исполняемый файл. Результаты его выполнения содержат информацию о нейтронном потоке в различных частях прибора, которые могут быть представлены в большом числе форматов, в том числе в виде текстовых файлов. Пакет включает в себя также графический пользовательский интерфейс, встроенное средство визуализации инструмента и результатов и несколько вспомогательных программ. Имеется поддержка параллельных вычислений с использованием технологий SSH (Secure Shell, безопасная оболочка) и MPI (Message Passing Interface, интерфейс передачи сообщений).

Любая оптическая система в McStas моделируется как последовательность компонентов. Важной их особенностью является сочетание геометрического и физического описания моделируемого объекта в одном коде, что налагает некоторые ограничения на моделируемые системы. Все компоненты можно разделить на три группы.

Компонент типа источник служит для генерации нейтронных траекторий. Каждой из них случайным образом сопоставляется набор величин — начальные координаты \mathbf{r} , скорость \mathbf{v} , поляризация \mathbf{P} , время рождения t и вероятностный вес p. Параметры \mathbf{r} и \mathbf{v} ограничены геометрией источника и параметрами замедлителя. Время рождения t используется для установок, использующих время-пролетную методику. У каждой только что созданной траектории p = 1.

Большинство последующих компонентов, которые моделируют зеркала, нейтроноводы, монохроматоры, прерыватели и пр., принимают параметры траекторий в качестве входных, меняют их согласно заданным законам рассеяния и передают следующему компоненту. Здесь демонстрирует высокую эффективность применение вероятностного веса *p*. Например, если нейтроны сталкиваются с зеркалом, вероятность отражения от которого составляет 50%, то в соответствии со строгим рассмотрением половина нейтронов должна быть поглощена, а половина — отражена. Иными словами, все вычисления, производившиеся ранее с половиной нейтронов, оказываются бесполезны, а статистическая ошибка результата растет. Гораздо эффективнее отразить все траектории, но модифицировать их вероятностный вес, умножив его на 0.5.

На рис. 2.1 приведена блок-схема алгоритма широко используемого в данной работе компонента *Guide_gravity*, который моделирует прохождение нейтрона по нейтроноводу. После попадания нейтронной траектории в компонент рассчитывается время до столкновения с каждой из четырех плоскостей, содержащих стенки нейтроновода. Затем нейтрон переносится в точку столкновения со стенкой, которой соответствует минимальное положительное время. Далее происходит отражение, сопровождающее изменением проекции скорости и вероятного веса. Цикл повторяется пока траектория не покинет нейтроновод.



Рис. 2.1. Блок-схема алгоритма компонента $Guide_gravity$. Здесь v — проекция **v** на ось, содержащую нормаль.

Отражательная способность зеркал R(Q) аппроксимируется следующей формулой:

$$R = \begin{cases} R_0 & Q \le Q_c \\ \frac{1}{2} R_0 \left(1 - \tanh\left(\frac{Q - mQ_c}{W}\right) \right) \left(1 - \alpha(Q - Q_c) \right) & Q > Q_c, \end{cases}$$
(2.1)

где R_0 — отражательная способность в режиме ПВО, W — величина, характеризующая срез рефлективности на mQ_c , α — наклон отражательной способности в суперзеркальном режиме. Для всех расчетов в данной работе использовались следующие значения: $R_0 = 0.99$, $Q_c = 0.0218$ Å⁻¹, $\alpha = 3.3$ Å и W = 0.003 Å⁻¹, которые были выбраны на основе данных, приведенных на рис. 1.1.

Особый тип компонентов составляют мониторы. Получив параметры очередной траектории, они никак не трансформируют их, а записывают в отдельный файл результатов. Мониторы могут размещаться в любой части инструмента, что позволяет следить за всеми изменениями нейтронного потока по пути его движения.

Таким образом, результатом любой симуляции является файл (обычно файлы), в котором сохранены вероятностные веса p_i для каждой дошедшей до монитора нейтронной траектории. Тогда интенсивность *I* дается следующим выражением:

$$I = \sum_{i=1}^{N} p_i, \qquad (2.2)$$

где N — количество записанных траекторий. Относительную ошибку $\sigma(I)$ в первом приближении можно оценить как

$$\sigma(I) = \frac{1}{\sqrt{N}}.\tag{2.3}$$

Мониторы сохраняют как интенсивность I, так и количество траекторий N, что позволяет корректно оценивать статистическую ошибку.

2.2.2 Библиотека iFit

Важной особенностью McStas является интеграция с MATLAB посредством библиотеки iFit [86].

Во-первых, такая интеграция помогает быстро обрабатывать полученные данные и визуализировать результаты.

Во-вторых, что более существенно, открывается возможность к оптимизации нейтронных инструментов по заданному критерию в многопараметрических пространствах. Библиотека iFit содержит реализации большого количества оптимизационных алгоритмов. Так как результаты расчетов методом Монте-Карло являются сравнительно «шумными», далеко не все широко распространенные методы многопараметрической оптимизации оказываются подходящими. Сравнение различных подходов проводилось в работах [87, 88] и, по-видимому, наиболее оптимальным является метод роя частиц [89].

Подобная оптимизация оказывается ценной при большом количестве варьируемых параметров, которые сложным образом влияют друг на друга и на общий результат расчетов. Работы [40,90] служат хорошими примерами эффективности использования многопараметрических оптимизаций для нужд нейтронного рассеяния.

2.3 Верификация методики

Пакет McStas используется большим количеством независимых групп, и результаты расчетов оказываются в хорошем согласии с реально измеряемыми параметрами установок (см., напр., [62, 91, 92]). Типичное отклонение расчетных значений плотности потока от измеряемых составляет менее 10%.

Также было подтверждено корректное поведение моделей, разработанных автором диссертации. Нейтроноводы, создаваемые для реактора ИР-8 в Курчатовском Институте (Москва), были смоделированы двумя способами: с помощью McStas и пакета, разработанного ранее в НИЦ КИ ПИЯФ. Последний пакет ранее прошел валидацию сравнением с реальными измерениями [93].

На рис. 2.2(a) показано сравнение спектров на выходе одного из нейтроноводов реактора ИР-8. Нейтроновод имеет сечение 42×60 мм² и длину 21 м



Рис. 2.2. Сравнение расчетов, сделанных в программном пакете McStas и методом, описанным в работе [93] (обозначено как проект): (a) спектры на выходе нейтроновода H1; (б) вертикальная расходимость на выходе нейтроновода H1.

и снабжает нейтронами малоугловую установку. McStas позволяет как получить оценку наибольшего потока в идеальном случае, так и учесть различные факторы потерь. На рис. 2.2(б) приведен профиль вертикальной расходимости на выходе того же нейтроновода. Обращают на себя внимание осцилляции, видимые в случае использования McStas и отсутствующие в результатах, полученных другим методом. Это связано с тем, что McStas позволяет корректнее описывать геометрию источника нейтронов и, таким образом, учитывается недоосвещенность нейтроновода. Из обоих примеров следует хорошее согласие McStas и ранее применявшегося программного пакета.

Также автором диссертации был разработан внутриканальный фильтр тепловых нейтронов для рефлектометра с вертикальной плоскостью рассеяния Реверанс на реакторе ВВР-М (НИЦ КИ ПИЯФ, Гатчина). Устройство обеспечивает грубую монохроматизацию пучка, а также придает пучку угол относительно горизонта. Фотография фильтра представлена на рис. 2.3. Реальные измерения пучка продемонстрировали хорошее совпадение с предсказанными с учетом частичной прозрачности стенок фильтра [94],[А3].



Рис. 2.3. Внутриканальный фильтр тепловых нейтронов для установки Реверанс на рекаторе BBP-M.

2.4 Выводы

На сегодняшний день оптимальная стратегия расчета нейтроновода выглядит следующим образом. На основании предварительного рассмотрения оптической системы, подкрепленного аналитическими или диаграммными расчетами, создается компьютерная модель. Дальнейший расчет методом Монте-Карло позволяет точно учесть различные эффекты, трудно поддающиеся описанию другими методами, и найти оптимальные параметры. В случае получения любых «подозрительных», трудно интерпретируемых результатов следует вернуться к классическому анализу и определить, ошибка ли это вычислений или реальный физический эффект.

Для расчетов был выбран программный пакет McStas, отличающийся универсальностью, удобным графическим интерфейсом и качественной технической поддержкой. Была верифицирована не только его правильность работы, но и подтверждена достоверность моделей, разработанных автором диссертации для нейтроноводной системы реактора ИР-8.

Глава 3

Инструментарий моделирования нейтроноводных систем

3.1 Оптимизация нейтроноводной системы

Разработка нейтроноводной системы нейтронного источника является сложной многопараметрической задачей. С одной стороны, каждая нейтронная установка имеет собственные требования к оптике и в идеальном случае нуждается в индивидуальном нейтроноводе. С другой стороны, в наличии имеется лишь один канал, примыкающий к источнику холодных нейтронов, что требует согласования отдельных решений по нейтроноводам. Задачу, таким образом, можно условно разбить на две связанные составляющие: оптимизацию индивидуальных нейтроноводов и оптимизацию нейтроноводной системы как целого.

В то время как критерий оптимизации любого нейтроновода известен (максимальная пропускающая способность «полезных» нейтронов), вопрос о критерии оптимизации нейтроноводной системы в целом не так прост. Ясно, что набор идеальных нейтроноводов можно скомпоновать в систему множеством способов, откуда вытекает вопрос о способе поиска оптимального решения. Можно выделить две основные характеристики HC: ее стоимость и удобство размещения приборов. Стоимость нейтроноводов в первом приближении пропорциональна их длине, таким образом суммарная длина нейтроноводов должна быть минимизирована. Удобство использования приборов можно связать со свободным пространством вокруг узла образца, с простотой доступа к нему.

Задача размещения приборов в зале может быть сведена к известной задаче о раскрое [95]. Задача создания кратчайшего дерева, соединяющего набор точек, является другой известной задачей Штейнера о минимальном дереве [96]. Похожая на оптимизацию нейтроноводной системы задача решается при проектировании микросхем, когда размещение дискретных элементов на плате и дальнейшее их соединение дорожками проводится в рамках процедуры placeand-route. В общем случае эта задача, как и предыдущие, относится к классу NP-полных.

Эти аналогии позволяют предположить, что и задача оптимизации HC относится к классу NP-полных или, по крайней мере, к NP-трудным. С практической точки зрения это означает, что невозможно найти точное оптимальное решение за разумное время, а необходимо ограничиться нахождением достаточно хорошего решения.

Так как количество инструментов, которые необходимо снабжать нейтронами, относительно невелико, было решено отказаться от использования какоголибо оптимизационного алгоритма и использовать подход, аналогичный упоминавшейся выше процедуре place-and-route: на первом этапе происходит размемещение нейтронных установок в экспериментальном зале, далее к ним подводятся нейтроноводы.

Были сформулированы следующие принципы расстановки приборов в зале:

- Расстановка приборов должна способствовать минимизации общих потерь в нейтроноводной системе. Уточнение этого критерия требует анализа различных факторов потерь в нейтроноводах, который проведен в параграфе 3.2.
- Приборы должны быть разбиты на два типа по их принципиальной геометрии: расположение сбоку от оси нейтроновода или на ее продолжении.
 Приборы одного типа должны размещаться на смежных позициях, что обеспечит наиболее эффективное использование площади нейтроноводного зала.
- Приборы должны быть разбиты на группы по сходным требованиям (спектр,

расходимость, сечение) к нейтронному пучку. Приборы одной группы должны размещаться на смежных позициях, что позволяет минимизировать общую длину ветвящихся нейтроноводов. Эта задача в основном может быть решена на основе обзора литературы, но несколько вопросов требуют более детального рассмотрения:

- Выбор оптимального типа нейтроновода для инструмента, использующего кристаллический монохроматор, который рассматривается в параграфе 3.3;
- Оценка эффективности использования баллистических нейтроноводов на замедлителе большого объема, которая проводится в параграфе 3.4;
- Анализ эффективности двух видов нейтроноводов-трансформеров, который производится в параграфах 3.5 и 3.6.

На основе этих принципов была проведена расстановка приборов на реакторе ПИК, описанная в параграфе 4.1. Далее оптимизировались нейтроноводы, обеспечивающие транспорт нейтронов от реакторного канала до станций нейтронного рассеяния с учетом специфических требований каждого прибора. Найденные параметры нейтроноводов приводятся в параграфах 4.2 и 4.3.

3.2 Оценка потерь

В табл. 3.1 приведены результаты систематического исследования различных факторов потерь. Расчеты проводились для нейтроноводов различных длин и сечений, при этом длина одной секции принималась везде равной 1 м. Ввиду случайного характера распределения ошибок юстировок нейтроноводов расчеты для каждой геометрии повторялись 5 раз и в таблице приведен усредненный результат. В табл. 3.2 приведены обозначения факторов и их принятые характерные значения, которые определялись после ознакомления с современным состоянием промышленности, технологии напыления и консультаций со специалистами НИЦ КИ ПИЯФ. Так как приводится интегральное пропускание по всему спектру, важно заметить, что в качестве источника нейтронов использовался описанный ранее ИХН ГЭК-3.

<i>L</i> , м	$S, \text{ mm}^2$	wavy	R_0	A_v	A_h	A_{rot}	shift	gap	all	all (calc)
10	30×30	0.97	0.88	1.00	0.94	1.00	0.98	1.00	0.80	0.79
	30×60	0.99	0.91	1.00	0.94	1.00	0.99	1.00	0.86	0.84
	30×120	0.99	0.93	1.00	0.94	1.00	0.99	1.00	0.88	0.86
	30×180	0.99	0.93	1.00	0.95	0.99	0.99	0.99	0.88	0.86
30	30×30	0.91	0.70	1.00	0.83	1.00	0.96	1.01	0.54	0.51
	30×60	0.93	0.76	1.00	0.83	0.99	0.96	1.00	0.59	0.56
	30×120	0.95	0.80	1.01	0.83	0.99	0.97	1.00	0.64	0.61
	30×180	0.95	0.81	1.01	0.83	0.99	0.98	1.00	0.66	0.63
60	30×30	0.84	0.52	1.00	0.69	0.99	0.91	1.00	0.32	0.27
	30×60	0.87	0.61	1.00	0.68	1.00	0.94	1.00	0.38	0.34
	30×120	0.89	0.65	0.99	0.68	0.99	0.95	0.99	0.43	0.36
	30×180	0.91	0.67	1.00	0.71	0.98	0.95	1.00	0.45	0.40
100	30×30	0.77	0.37	1.00	0.53	0.99	0.86	1.00	0.17	0.13
	30×60	0.81	0.45	0.99	0.53	0.98	0.89	0.99	0.22	0.17
	30×120	0.84	0.51	0.99	0.55	0.97	0.91	0.99	0.25	0.21
	30×180	0.85	0.54	0.99	0.55	0.96	0.92	0.99	0.27	0.22

Таблица 3.1. Интегральное пропускание нейтроноводов различной длины L и сечения S с учетом возможных факторов потерь. Описание факторов потерь приведено в табл. 3.2.

Обозначение	Фактор	Значение			
wavy	Волнистость	$0.18 imes 10^{-3}$ рад			
R_0	Отражательная способность	0.97			
A_v	Угловые разъюстировки (вер.)	$0.02 \mathrm{MM/M}$			
A_h	Угловые разъюстировки (гор.)	$0.18 imes 10^{-3}$ рад			
A_{rot}	Поворот вокруг оси пучка	$0.18 imes 10^{-3}$ рад			
shift	Сдвиг	0.02 мм			
gap	Зазор между секциями	0.2 мм каждые 2 секции			
all	Все факторы				
all (calc)	Все факторы (расчет)				

Таблица 3.2. Обозначение факторов потерь и их принятые характерные значения.

Приведенные результаты позволяют утверждать, что такие факторы потерь как разъюстировка секций в вертикальной плоскости, их вращение вокруг оси пучка, зазоры между секциями фактически не вносят потерь в нейтронный поток. Интересно, что механическое перемножение всех факторов потерь (предпоследний столбец табл. 3.1) дает заниженное значение трансмиссии по сравнению с прямым расчетом, учитывающим все факторы потерь (последний столбец той же таблицы).

Более детально были рассмотрены наиболее важные факторы потерь. Для нейтроноводов сечением 30×30 мм² различной длины были построены спектральные зависимости потерь (см. рис. 3.1).



Рис. 3.1. Потери в зависимости от длины волны для нейтроноводов сечением $30 \times 30 \text{ мм}^2$ различной длины *L*. Потери, вызванные (a) — волнистостью, (b) — сниженной отражательной способностью, (c) — угловыми разъюстировками, (d) — всеми факторами.

Волнистость приводит к потерям в основном в тепловой части спектра, что становится особенно заметно при больших длинах нейтроноводов. В то же время даже для 100-метрового нейтроновода потери 10 Å нейтронов составляют всего около 20%.

Потери, вызванные сниженной отражательной способностью, имеют ярко выраженную зависимость от длины волны и являются основным фактором снижения интенсивности пучков холодных нейтронов. Зависимость носит квадратичный характер и связана с увеличением количества соударений нейтронов со стенками нейтроновода. Из этого следует, что основные потери в пучке приходятся на более расходящуюся часть. Таким образом, инструменты, использующие коллимированные пучки, снижают свою эффективность не так сильно, как показано на рис. 3.1.

Угловые разъюстировки приводят к потерям, практически не имеющим спектральной зависимости и, по-видимому, связаны главным образом с «затенением» части сечения нейтроновода на стыках секций.

Полученные результаты позволяют выработать рекомендации по размещению инструментов в нейтроноводном зале:

- Ближе всего к реактору следует располагать инструменты, требующие тепловой части спектра и использующие двойную фокусировку — например, такие как трехосные и время-пролетные спектрометры;
- 2. Далее следует размещать времяпролетные рефлектометры, использующие фокусировку в одном направлении и имеющие широкой спектральный рабочий диапазон;
- На наибольшем расстоянии от реактора разумно размещать малоугловые инструменты, использующие коллимированные пучки холодных нейтронов.

Подобный подход позволяет минимизировать влияние потерь на полезный нейтронный поток на образцах установок.

Некоторые из указанных в табл. 3.2 значений являются достаточно консервативными. Показатель отражательной способности в области ПВО у современных зеркал может достигать 0.99 и даже 0.995.

На рис. 3.2 показаны зависимости потерь от длины волны для различных геометрий нейтроновода при различном значении отражательной способности R_0 . Видно, что улучшение этого параметра с 0.97 до 0.99 приводит к 2–3-кратному снижению потерь. При общей умеренной величине потерь (как на рис. 3.2a) это означает рост интенсивности приблизительно на 30%. В случае серьезных потерь (как на рис. 3.2b) это может означать выигрыш в интенсивности до 4 раз.



Рис. 3.2. Зависимости потерь от длины волны нейтронов для нейтроновода сечением 30×30 мм² длиной (a) 10 м и (b) 100 м для различных значений отражательной способности R_0 .

Юстировка секций координатным методом вместо автоколлимационного позволяет достичь угловой точности по горизонтали 0.02 мм/м. Потери, вызванные этим фактором, при использовании данного метода становятся пренебрежимо малыми (см. значения A_v в табл. 3.1). Для длинных нейтроноводов малого сечения это позволяет получить почти 2-кратный выигрыш в интенсивности.

Приведенные выше факты указывают на необходимость, во-первых, обратить особое внимание на качество поверхности при производстве нейтронных зеркал и, во-вторых, внедрить координатный метод юстировки нейтронных секций. Помимо прямого результата применения таких мер, выраженного в росте нейтронного потока, будет получен и косвенный — снижение необходимого объема защиты нейтроноводов.

3.3 Инструменты с кристаллическими монохроматорами

3.3.1 Постановка задачи

Для большинства инструментов, использующих кристаллические монохроматоры с горизонтальной плоскостью отражения, применяются классические нейтроноводы постоянного сечения в сочетании с вертикально фокусирующим монохроматором. В связи с высокой эффективностью различных типов баллистических нейтроноводов для времяпролетных инструментов, была проведена проверка, окажутся ли они так же эффективны в случае использования кристаллического монохроматора. Были рассмотрены две альтернативы нейтроноводу постоянного сечения (см. рис. 3.3). Первая возможность заключается в использовании расширяющегося нейтроновода параболической формы, который доставляет к монохроматору хорошо коллимированный пучок большого сечения. Другой вариант состоит в использовании эллиптического нейтроновода, создающего виртуальный источник нейтронов перед фокусирующим монохроматором или позади него.

Перечисленные варианты рассматриваются на примере монохроматического рефлектометра. Схема моделируемого инструмента представлена на рис. 3.4.

Выходное окно канала имеет высоту 200 мм, что задает максимальную начальную высоту нейтроновода. Длина канала, то есть расстояние от светящейся поверхности до начала оптики, составляло $L_b = 1.845$ м. Длина нейтроновода была положена равной 40 м. Исходя из удобства вычислений, ширина нейтроновода была выбрана равной 1 см. Боковые стенки были покрыты природным никелем.

Для монохроматора был использован пиролитический графит с отражением 002, что соответствует межплоскостному расстоянию d = 3.355 Å. Длина волны была равна $\lambda = 5.18$ Å. Монохроматор состоял из нескольких горизонтальных пластин, каждая высотой 10 мм. Их число выбиралось таким образом, чтобы полностью перекрыть падающий пучок.

Высота образца была принята за 1 см. Расстояние между монохроматором и образцом составляло 4.65 м, где были размещены две щели. Первая из них находилась на расстоянии 2.5 м перед образцом, а вторая — 0.5 м. Обе щели имели ширину 3 мм и бесконечную высоту.

3.3.2 Нейтроновод постоянного сечения

Рассмотрим нейтроновод постоянного сечения. Была проведена серия расчетов с различными параметрами нейтроновода (покрытие стенок) и монохроматора (мозаичность и радиус фокусировки).

Рис. 3.5 демонстрирует, что поток на выходе нейтроновода увеличивается



Рис. 3.3. Рассматриваемые конфигурации нейтроноводов: (a) нейтроновод постоянного сечения; (b) расширяющийся нейтроновод параболической формы; (c) эллиптический нейтроновод. Дополнительно показаны основные геометрические параметры и варьируемые параметры (подробнее см. в тексте ниже).



Рис. 3.4. Принципиальная схема моделируемого рефлектометра. Вид сверху, не в масштабе. Пунктирная линия обозначает нейтронный пучок.

при увеличении критического угла верхней и нижней стенок вплоть до m = 4. Дальнейшее увеличение покрытия не приводит к увеличению потока из-за низкой отражательной способности суперзеркал при больших углах.

На рис. 3.6а показано, как изменяется поток на образце в зависимости от мозаичности монохроматора. Рост мозаичности приводит к увеличению расходимости монохроматичного пучка и «размытию» освещенного пятна в положении образца. Пока высота пятна составляет менее 1 см (что соответствует высоте образца), поток имеет тенденцию к увеличению с ростом мозаичности. При дальнейшем росте расходимости дополнительные лучи перестают попадать в образец. Это означает, что существует некоторое оптимальное значение мозаичности, превышение которого приводит только к дополнительному фону. В рассматриваемом случае это значение составляет $\eta = 35'$.

Важно, что на поток на образце не влияет увеличение значения m выше 3, а конфигурация с m = 2 демонстрирует лишь незначительное уменьшение потока, что связано с заданными значением мозаичности и размером образца.

Также было определено оптимальное условие фокусировки монохроматора. Результаты представлены на рис. 3.6b. Наибольший относительный выигрыш может быть получен для конфигурации с m = 1, но в абсолютных значениях поток для m = 2 оказывается больше. Важно, что с точки зрения потока нет разницы между случаями m = 2 и m = 3. Эти результаты являются следствием того факта, что фокусировка работает эффективнее для хорошо коллимированного пучка.

Таким образом, были найдены оптимальные параметры: покрытие нейтроновода m = 2, мозаичность монохроматора $\eta = 35'$ и радиус кривизны R = 3 м. Максимальный поток в позиции образца составляет $\Phi = 1.75 \times 10^6$ н/с. Чтобы подтвердить эту пошаговую процедуру, которая выполнялась с допущением, что между параметрами нет корреляций, была проведена оптимизация симплекс-методом с тремя свободными параметрами. В то время как оптимизированные параметры весьма отличны от найденных ранее (m = 5.5, $\eta = 50'$, R = 4 м), поток оказался почти таким же ($\Phi = 1.8 \times 10^6$ н/с). Это можно объяснить существованием обширных частей пространства параметров с почти равным потоком на образце (см., например, рис. 3.6а, где поток не зависит от мозаичности при $\eta > 35'$). В такой ситуации оптимизатор не имеет критериев для выбора конкретного значения параметра и не найдет оптимального решения с финансовой или фоновой точек зрения.



Рис. 3.5. Поток на выходе нейтроновода постоянного сечения при различных покрытиях верхней и нижней стенок.



Рис. 3.6. Поток на позиции образца для нейтроновода постоянного сечения при различных m: (a) в зависимости от мозаичности монохроматора; (b) в зависимости от радиуса кривизны монохроматора. Пунктирные линии на рис. (b) обозначают поток на образце в случае плоского монохроматора для m = 1, 2, 3 соответственно.

3.3.3 Расширяющийся нейтроновод

Учитывая тот факт, что хорошо коллимированный пучок лучше подходит для фокусировки, было решено использовать расширяющуюся секцию в начале нейтроновода, чтобы получить пучок большого поперечного сечения с хорошей коллимацией в положении монохроматора. Расширяющейся части была придана форма параболы.

Для этого случая увеличивается число переменных параметров: к рассматривавшимся ранее покрытию нейтроновода постоянного сечения, мозаичности и кривизне монохроматора добавляются длина расширяющегося участка *L* и положение фокальной точки параболы (фокусное расстояние),

Рассмотрим поток на выходе нейтроновода. Результаты моделирования представлены на рис. 3.7. На основании этих графиков можно определить положение фокальной точки для каждой геометрической конфигурации. Видно, что оптимальная точка фокусировки в любом случае лежит в области 0.5–1 м, что примерно соответствует половине длины канала L_b . Увеличение длины расширяющейся секции и покрытия секции с постоянным сечением приводят к увеличению потока на выходе нейтроновода.

На рис. 3.8 показан поток на образце при использовании плоского монохроматора. Зависимости интенсивности от мозаичности для расширяющегося нейтроновода показывают поведение, аналогичное поведению для нейтроновода постоянного сечения (см. рис. 3.6а). Для никелевого покрытия все кривые одинаковы, в то время как для более высоких *m* предпочтительна короткая расширяющаяся секция. Это связано с тем, что длинная расширяющаяся секция приводит к слабо расходящемуся пучку, который хорошо транспортируется никелевым нейтроноводом. Более короткие секции работают не столь хорошо и требуют более высокого покрытия. Общее превосходство конфигураций с короткими расширяющимися секциями обусловлено природой плоского монохроматора: ему требуется более высокая яркость, а не общий поток, в то время как использование расширяющегося нейтроновода ведет к низкой плотности потока.

С учетом найденных значения мозаичности и положения фокуса была рассмотрена конфигурация с фокусирующим монохроматором. Результаты моделирования представлены на рис. 3.9. Фокусировка дает значительное увеличение потока на образце, но абсолютная величина потока не превышает достигнутую в случае нейтроновода постоянного сечения. Интересно отметить, что максимальный поток на образце получается с использованием кратчайшего расширяющегося участка, что находится в прямом противоречии со случаем потока на выходе нейтроновода.

Была еще раз выполнена симплекс-оптимизация со всеми свободными переменными. Оказалось, что положение фокуса имеет тенденцию смещаться как можно дальше от входа в нейтроновод, а длина расширяющейся секции, как правило, минимальна. Это означает, что вся конфигурация становится похожей на нейтроновод постоянного сечения.



Рис. 3.7. Поток на выходе расширяющегося нейтроновода для различных значений m = 1-4 ((a)–(d) соответственно) и различных длин расширяющейся секции L в зависимости от положения фокальной точки.



Рис. 3.8. Поток на образце при использовании плоского монохроматора для случая расширяющегося нейтроновода в зависимости от мозаичности. (a)–(c) соответствуют покрытиям нейтроновода m = 1–3.



Рис. 3.9. Поток на образце при использовании фокусирующего монохроматора в случае расширяющегося нейтроновода в зависимости от радиуса кривизны монохроматора. (а)–(с) соответствуют покрытиям нейтроновода m = 1-3. Пунктирная линия соответствует потоку при использовании плоского монохроматора.

3.3.4 Эллиптический нейтроновод

Альтернативный способ доставки пучка с высокой вертикальной расходимостью к образцу заключается в использовании эллиптического нейтроновода, который имеет большую апертуру захвата источника и формирует виртуальный источник перед монохроматором, который в свою очередь перефокусирует пучок на образец. Здесь переменными являются расстояние от входа до левого фокуса f_{left} и от выхода нейтроновода до правого фокуса f_{right} , положение монохроматора относительно правой фокусной точки, его мозаичность и радиус кривизны.

Рис. 3.10 содержит результаты оптимизации эллиптического нейтроновода. Наилучшим решением оказывается использование возможно большего левого фокусного расстояния f_{left} и более короткого правого фокусного расстояния f_{right} .



Рис. 3.10. Плотность потока на выходе эллиптического нейтроновода в зависимости от левого фокусного расстояния для различных правых фокусных расстояний.

Рис. 3.11 иллюстрирует оптимизацию монохроматора, а именно выбор его мозаичности, кривизны и положения относительно правого фокуса. Монохроматор лучше всего размещать прямо в фокусе, а кривизна не приводит к какомулибо усилению из-за большой расходимости луча и небольшого размера пятна.



Рис. 3.11. Поток на образце в случае эллиптического нейтроновода: (a) зависимость от мозаичности монохроматора; (b) зависимость от радиуса фокусировки для различных значений l.

Эта конфигурация превосходит те, которые имеют большее расстояние между монохроматором и фокусом, хотя они и имеют больший относительный коэф-фициент усиления из-за фокусировки.

Симплекс-оптимизация по критерию потока на образце привела к очень большим значениям обоих фокусных расстояний f_l и f_r , что превращает эллиптический нейтроновод в почти прямой. Полученная несогласованность с результатами на рис. 3.10 еще раз указывает на необходимость оптимизации нейтроноводов по критерию потока на образце, а не потока на выходе из нейтроновода, а также демонстрирует опасность пошаговой оптимизации оптики как единственного метода.

3.3.5 Обсуждение

На рис. 3.12 горизонтально интегрированное поперечное сечение пучка на образце представлено для различных конфигураций нейтроновода и инструмента, изображенного на рис. 3.4. Синие линии показывают полезную высоту пучка, которая соответствует размеру образца.

При рассмотрении общего потока на позиции образца эллиптический нейтроновод обеспечивает лишь 0.35 потока нейтроновода постоянного сечения, а расширяющийся имеет выигрыш в 1.79 раза. При учете размера образца получается иное соотношение, а именно, обе альтернативные конфигурации уступают стандартной и обеспечивают только 0.7 потока. Превосходство стандартной



Рис. 3.12. Вертикальное сечение пучка на образце для различных конфигураций нейтроновода: постоянного сечения, расширяющегося и эллиптического. Синие линии показывают полезную высоту пучка, которая соответствует размеру образца.

конфигурации подтверждается и вышеприведенными результатами симплексоптимизаций.

Рис. 3.12 также показывает, что во всех случаях большое количество нейтронов не попадает на образец заданного размера. Представляется полезным ввести фокусирующий нейтроновод между монохроматором и образцом, сходящийся в вертикальном направлении. На рис. 3.13 показано, что возможный выигрыш при использовании такого устройства может достигать 2.25 раз. Около 71% всех отраженных нейтронов транспортируется в положение образца (поглощаются те, что имеют наибольшую расходимость), что означает, что применение более сложной формы нейтроновода в принципе может дать дополнительный выигрыш в 40%. Изложенные в этом параграфе результаты опубликованы в работе [А6].



Рис. 3.13. Выигрыш при использовании фокусирующего нейтроновода в зависимости от высоты на выходе нейтроновода.

3.4 Эффективность баллистических нейтроноводов

Эффективность применения баллистических нейтроноводов обычно демонстрируется сравнением с нейтроноводами постоянного сечения. Корректнее было бы сравнить их эффективность с нейтроноводами с фокусирующими концентраторами на конце — так называемыми «носами».

Для сравнения были созданы две модели: баллистический (эллиптический) нейтроновод и нейтроновод постоянного сечения с носом. Оба нейтроновода имеют начальную высоту 200 мм и длину 50 м. Расстояние от конца нейтроновода до образца составляло 500 мм. Для простоты правый фокус во всех случаях помещался точно на образец. Нейтроноводы оптимизировались по критерию потока на образце для спектра от 2 до 20 Å.

На рис. 3.14а приведены результаты оптимизации формы эллиптического нейтроновода. Варьировалось положение левого фокуса, при этом значение нейтронного потока снималось для трех различных размеров образца. Видно, что оптимальное положение фокуса практически не зависит от размера образца и составляет около 1 м, то есть приблизительно посередине между светящейся поверхностью и входом в оптику. На рис. 3.14b приведены зависимости потока на образце от длины концентратора для нейтроновода с носом. Оптимальная длина концентратора составляет около 6 м.



Рис. 3.14. (a) Зависимость потока на образце от положения левого фокуса эллиптического нейтроновода. (b) Зависимость потока на образце от длины концентратора. Цветом показаны зависимости для различных размеров образца.

Сравнение спектров оптимизированных таким образом нейтроноводов приведено на рис. 3.15. Как и следовало ожидать, полностью эллиптический нейтроновод позволяет получить заметный выигрыш до 40% в холодной области спектра.

При более внимательном рассмотрении геометрии оптимизированного эллиптического нейтроновода оказывается, что максимальная высота нейтроновода в центральной части составляет более 600 мм. Такая высота создает огромные технологические трудности из-за веса стекла. По этой причине была создана модифицированная модель, где центральная часть была заменена на участок постоянного сечения с высотой 320 мм, что составляет практический предел для современных зеркал.

Подобное изменение геометрии неизбежно ведет к изменению трансмиссии нейтроновода. На рис. 3.16а приведены потери от такой замены для различной высоты центральной секции. Выбор указанной ранее высоты 320 мм особенно сильно влияет на пропускание коротковолновых нейтронов.

На рис. 3.16b приведено сравнение спектров модифицированного эллиптического нейтроновода и нейтроновода с концентратором. По сравнению с рис. 3.15



Рис. 3.15. Зависимость от длины волны отношения потоков на образце для двух нейтроноводов — эллиптического к снабженному концентратором. Цветом показаны зависимости для различных размеров образца.



Рис. 3.16. (а) Снижение трансмиссии эллиптического нейтроновода при введении прямой секции в его центральную часть для различных длин волн в зависимости от высоты этой секции. (b) Отношение потоков на образце для модифицированного эллиптического нейтроновода и нейтроновода с концентратором в зависимости от длины волны. Цветом показаны зависимости для различных размеров образца.

хорошо заметна просадка в области тепловых нейтронов.

Таким образом установлено, что модифицированный эллиптический нейтроновод, отвечающий реалистичным техническим возможностям, является технологически более сложным изделием (из-за высоты стекол 320 мм) и доставляет больше холодных нейтронов. Нейтроновод с концентратором технологически проще и обеспечивает больше тепловых нейтронов. Можно сказать, что начальная часть нейтроновода отвечает за холодные нейтроны, а конечная часть — за тепловые.

Рассмотрим детальнее нейтроновод с концентратором.

Уменьшение высоты такого нейтроновода может привести к улучшению фоновых условий. Оптимизация высоты происходила следующим образом. Для каждой высоты нейтроновода находилась оптимальная длина фокусирующего носа. Максимальный достигнутый поток на образце далее откладывался как функция от высоты нейтроновода. Расчеты проводились для различных длин волн и для носов полуэллиптической или параболической формы. Все результаты приведены на рис. 3.17 и рис. 3.18.

Для всех ситуаций оказалось, что полуэллиптический нос имеет такую же эффективность как параболический или приблизительно на 10% больше. При этом оптимальная длина полуэллиптического носа всегда заметно больше, чем у параболического. На основе анализа результатов (эффективность не менее 90% относительно высоты 200 мм) следует принять для всех нейтроноводов высоту не более 140–150 мм.



Рис. 3.17. Оптимизация носа нейтроновода для длины волны нейтронов 2 Å. (а) Зависимость интенсивности от длины полуэллиптического носа для различных высот нейтроновода в метрах; (б) максимальный поток на образце в зависимости от высоты нейтроновода при использовании полуэллиптического носа; (в) зависимость интенсивности от длины параболического носа для различных высот нейтроновода в метрах; (г) максимальный поток на образце в зависимости от высоты нейтроновода при использовании параболического носа.



Рис. 3.18. Оптимизация носа нейтроновода для длины волны нейтронов 20 Å. (а) Зависимость интенсивности от длины полуэллиптического носа для различных высот нейтроновода в метрах; (б) максимальный поток на образце в зависимости от высоты нейтроновода при использовании полуэллиптического носа; (в) зависимость интенсивности от длины параболического носа для различных высот нейтроновода в метрах; (г) максимальный поток на образце в зависимости от высоты нейтроновода при использовании параболического носа.

3.5 Винтообразный нейтроновод

3.5.1 Постановка задачи

Оптимальным выбором оптики для рефлектометра с горизонтальной плоскостью образца является использование нейтроновода с мощной горизонтальной фокусировкой. Как показано в параграфе 3.4, оптимальная ширина нейтроновода с носом должна составлять около 140–150 мм. В условиях ГЭК-3 реактора ПИК, где размещается большое количество других нейтроноводов, такую ширину оказалось невозможно выделить, поэтому было решено использовать нейтроновод-трансформер. Рассматривались две возможные конфигурации трансформера: на основе винтообразного и восьмиугольного нейтроноводов.

3.5.2 Модель винтообразного нейтроновода

В пакете McStas не существует готовой модели винтообразного нейтроновода. Для создания оптических элементов сложной геометрии можно использовать специальный компонент guide any shape, использующий в качестве входных данных файл .off. Такой файл поддерживает описание поверхностей с помощью плоских многоугольников.

Для моделирования винтообразного нейтроновода использовалась геометрическая модель, созданная в пакете COMSOL. Для создания геометрического .off файла использовалось приближение поверхности винта треугольной сеткой, созданное встроенными средствами COMSOL (метод физического обоснования). Пример разбиения винта на треугольники приведен на рис. 3.19.

При таком подходе к моделированию необходимо достаточно точно описать кривизну поверхности. Для этого был проведен ряд расчетов с различной плотностью треугольников на единицу длины нейтроновода. Результаты приведены на рис. 3.20. Расчеты проводились для длины волны 5 Å, длина нейтроновода составляла 10 м. Сечение нейтроновода было принято 3×15 см².

Выход плотности потока на выходе нейтроновода на плато свидетельствует о достаточном для описания винтообразного нейтроновода количестве треугольников. Далее во всех расчетах принималась плотность треугольников 900 штук



Рис. 3.19. Внешний вид используемой модели винтообразного нейтроновода. Масштаб и количество треугольников показаны условно.

на метр при высоте 150 мм, или 6000 треугольников на 1 м^2 .

3.5.3 Оптические свойства

Винтообразный нейтроновод предназначен для поворота пучка на 90° вокруг собственной оси. Его эффективность можно определить как отношение плотности потока нейтронов на его выходе к плотности потока нейтронов на выходе обычного прямоугольного нейтроновода тех же сечения и длины в границах заданной расходимости. Было проанализировано, как эффективность винтообразного нейтроновода меняется в зависимости от спектра и расходимости пучка.

Были построены зависимости потока от длины нейтроновода. Строились как абсолютные зависимости, так и нормированные на поток на выходе прямого нейтроновода той же длины. Везде использовались нейтроноводы с покрытием m = 6. Прямой нейтроновод до винта имеет боковые никелевые стенки и верхнюю и нижнюю с покрытием m = 3.

Результаты для различных расходимостей приведены на рис. 3.21. Видно,



Рис. 3.20. Зависимость плотности потока нейтронов на выходе винтообразного нейтроновода от плотности треугольников.

что трансмиссия для малой расходимости ниже. Это связано с тем, что для меньшей расходимости требуется большая длина нейтроновода для ее переворота.

На рисунке 3.22 представлены трансмиссии для различных длин волн. Эффективность трансформации пучка растет с длиной волны и достигает 80% для 8 Å уже на 20 м.

Были построены зависимости трансмиссии нейтронов от ширины и высоты нейтроновода (рис. 3.23 и 3.24). Рассматривались нейтроны с длиной волны 2 Å и с минимальной расходимостью. Оказалось, что в то время как увеличение высоты нейтроновода приводит к заметному снижению эффективности трансформации пучка, влияние ширины нейтроновода незначительно.

Массив полученных данных позволяет сформулировать следующие выводы:

- 1. Винтообразный нейтроновод может служить эффективным трансформером нейтронного пучка: для 40-метрового нейтроновода трансмиссия составляет около 60% для нейтронов с длиной волны 2 Å.
- 2. Винтообразный нейтроновод проявляет оптические свойства во многом похожие на свойства изогнутого нейтроновода. С точки зрения пропуска-


Рис. 3.21. Трансмиссия нейтронов с длиной волны 2 Å с различной расходимостью в зависимости от длины винтообразного нейтроновода *L*. Здесь под малой расходимостью (красные кружки) понимается 0.1°, под средней (синие треугольники) — 0.5°, под большой (белые квадраты) — 2°.

ющей способности предпочтительно использование длинного винтообразного нейтроновода небольшой высоты аналогично тому, как растет трансмиссия изогнутого нейтроновода при уменьшении ширины и увеличении длины при фиксированном радиусе кривизны.



Рис. 3.22. Трансмиссия винтообразного нейтроновода для нейтронов различных длин волн с минимальной расходимостью.

3.6 Восьмиугольный нейтроновод

Вторая возможная конфигурация нейтроновода-трансформера основана на использовании восьмиугольного нейтроновода. Идея состоит в использовании наклонных стенок, отражение от которых приводит к «перекачке» расходимости пучка из вертикальной плоскости в горизонтальную. Сечение нейтроновода адиабатически изменяется от прямоугольного к восьмиугольному и затем назад к прямоугольному, повернутому на 90 градусов вокруг оси пучка. Схема трансформации пучка с помощью восьмиугольного нейтроновода приведена на рис. 3.25.

Введем следующие обозначения для описании геометрии восьмиугольного трансформера (см. рис. 3.25): w_1 и h_1 — начальные ширина и высота прямоугольного нейтроновода, w_2 и h_2 — конечные; $\omega(l)$ и $\eta(l)$ соответствуют ширине горизонтальных стенок и высоте вертикальных стенок на расстоянии l от на-



Рис. 3.23. Трансмиссия нейтронов с длиной волны 2 Å в зависимости от длины нейтроновода для различных ширин винтообразного нейтроновода.

чала трансформера; w(l) и h(l) обозначают расстояние между вертикальными и горизонтальными стенками соответственно на расстоянии l от начала трансформера.

Для определения геометрии трансформера необходимо задать все четыре функции w(l), h(l), $\omega(l)$ и $\eta(l)$. Ввиду симметричности задачи ($w_1 = h_2$ и $w_2 = h_1$) фактически необходимо выбрать два вида функций. Так как механизм трансформации основывается на отражениях от наклонных стенок, для высокой эффективности трансформера следует добиваться больших значений w и h в центральной части нейтроновода при одновременной минимизации ω и η .

Первую задачу можно было бы решить за счет использования, например, эллиптического профиля, но на деле это приводит к перефокусировке пучка после трансформации. Хотя интегральный поток на выходе нейтроновода оказывается довольно высок, поток в пределах заданной низкой расходимости очень



Рис. 3.24. Трансмиссия нейтронов с длиной волны 2 Å в зависимости от длины нейтроновода для различных высот винтообразного нейтроновода.

мал. Более удачным и простым вариантом оказалось использование линейных функций:

$$w(l) = w_1 + \frac{w_2 - w_1}{L}l \tag{3.1}$$

$$h(l) = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{L}l, \qquad (3.2)$$

где L — общая длина нейтроновода-трансформера и в нашем случае равна 40 м.

Для минимизации ω и η использовались параболические функции:

$$\omega(l) = \frac{w_2 - w_1}{L^2 - 2l_0L}l^2 + 2\frac{w_1 - w_2}{L^2 - 2l_0L}l_0l + w_1$$
(3.3)



Рис. 3.25. Схема трансформации пучка с помощью восьмиугольного нейтроновода.

$$\eta(l) = \frac{h_2 - h_1}{L^2 - 2(l - l_0)L} l^2 + 2\frac{h_1 - h_2}{L^2 - 2(l - l_0)L} (L - l_0)l + h_1, \qquad (3.4)$$

где l_0 обозначает расстояние от начала трансформера до вершины параболы. Значения $\omega(l_0)$ и $\eta(L - l_0)$ должны быть минимальны, но неотрицательны. На основании этого l_0 было принято равным 12 м. Функции $\omega(l)$ и $\eta(l)$ изображены на рис. 3.26.



Рис. 3.26. Функции $\omega(l)$ (синяя линия) и $\eta(l)$ (серая), характеризующие нейтроновод-трансформер на основе восьмиугольника.

Ясно, что найденная геометрия восьмиугольного нейтроновода может яв-

ляться неоптимальной. Ее уточнение является предметом дальнейших исследований с целью уменьшения общей длины трансформера, сглаживания неоднородности или повышения трансмиссию.

На рис. 3.27 приведены результаты расчетов нейтронного потока на выходе нейтроновода-трансформера в обеих конфигурациях: винтообразной и восьмиугольной. В качестве эталона также приведена горизонтальная расходимость на выходе прямоугольного нейтроновода той же длины без трансформации. К преимуществам винтообразного нейтроновода следует отнести близкий к идеальному профиль вертикальной расходимости. Восьмиугольный нейтроновод имеет сравнительно большую расходимость, что приводит к проседанию максимума распределения. Профиль его расходимости отличается наличием большого количества отдельных пиков. Разница связана с тем, что в винтообразном нейтроноводе нейтроны сталкиваются со стенками под одним и тем же углом (аналогично движению в изогнутом нейтроноводе), а в восьмиугольном — под разными (аналогично поведению в баллистическом нейтроноводе).



Рис. 3.27. Сравнение профилей вертикальной расходимости на выходе нейтроновода-трансформера для винтообразной и восьмиугольной конфигурации (а) для длины волны 2 Å; (б) для длины волны 5 Å.

В целом, оба трансформера имеют высокую эффективность: трансмиссия для 2 Å составляет не менее 57%, а для 5 Å — не менее 76%. В случае использования нейтроновода максимального доступного сечения (ширина 60 мм) без трансформера, трансмиссия составляла бы около 40% для всех длин волн.

На деле следует ожидать, что выполненный в металле винтообразный ней-

троновод будет иметь эффективность ниже расчетной, что связано с большими трудностями при изготовлении изогнутых секций. Учитывая также его повышенную стоимость, окончательный выбор был сделан в пользу восьмиугольного трансформера.

3.7 Выводы

Предложен способ оптимизации HC источника нейтронов как единого целого по аналогии с процедурой place-and-route. Сформулирована последовательность необходимых шагов для создания проекта HC реактора ПИК. На первом этапе необходимо провести расстановку нейтронных инструментов в экспериментальном зале на основе схожести их требований к нейтронному пучку, особенностей их геометрии, а также стремясь к минимизации потерь. На втором этапе осуществляется оптимизация нейтроноводов, а именно нахождение сечений, радиусов кривизны, точек ветвления и т.п.

Проведен анализ влияния различных факторов потерь на пропускающую способность нейтроноводов. Выявлены факторы, имеющие наибольшее влияние, и отмечена необходимость использования современных технических средств для их минимизации. Анализ влияния факторов потерь на нейтронный спектр позволил сформулировать дополнительные критерии расстановки инструментов в нейтроноводном зале.

Выполнение первого этапа оптимизации HC возможно только при условии выяснения оптимальных типов нейтроноводов для каждого проектируемого инструмента. Часть таких требований была известна из литературы, но некоторые случаи нуждались в специальном рассмотрении.

Показано, что нейтроновод постоянного сечения является оптимальным решением для инструментов, использующих кристаллические монохроматоры, если только не используются образцы нереалистично больших размеров. Продемонстрирована необходимость совместной оптимизации нейтроновода и инструмента, важность учета размера образца и других особенностей прибора. Показана высокая эффективность фокусирующей оптики, размещенной между монохроматором и образцом.

Проведено сравнение баллистических нейтроноводов и нейтроноводов с концентраторами. Продемонстрированы их сравнительные достоинства и недостатки с учетом технических ограничений и при использовании замедлителя большого объема. Для нейтроноводов с концентратором показана возможность уменьшения высоты без заметных потерь в потоке на образце.

Создана компьютерная модель винтообразного нейтроновода, позволившая

исследовать его оптические свойства в различных случаях. Показано, что винтообразный нейтроновод может служить эффективным трансформером пучка, и перечислены основные факторы, влияющие на его пропускающую способность. Также рассмотрен альтернативный трансформер на основе восьмиугольного нейтроновода. Найдена его геометрия, обеспечивающая высокую трансмиссию. Показано, что его оптические свойства схожи со свойствами баллистического нейтроновода. Сделан вывод о предпочтительности использования восьмиугольного нейтроновода в качестве трансформера пучка.

Полученные в главе результаты в сумме позволяют перейти непосредственно к решению главной задачи работы — нахождению оптимальной конфигурации нейтроноводной системы реактора ПИК.

Глава 4

Нейтроноводная система реактора ПИК

4.1 Общий вид нейтроноводной системы

4.1.1 Приборная база реактора ПИК

В настоящий момент предполагается создание 12 установок на канале ГЭК-3 реактора ПИК, к которым нейтроны должны доставляться по нейтроноводной системе. На момент создания НС большая часть из них находится на стадии проектирования.

Для исследования крупномасштабных наноструктур и магнитных объектов используются малоугловые установки в точечной геометрии. Методика состоит в измерении отклонения на малые углы нейтронного пучка, прошедшего через образец. Для этого до образца формируется протяженная коллимационная база порядка 10–20 м, а после образца — равная ей детекторная база. На реакторе ПИК эта методика будет реализована на установках SANS-2, Тензор и Мембрана. Важная особенность использования SANS-2 состоит в применении покрытия m = 2 для достижения дополнительной интенсивности при «нулевой» коллимации. Для доступа к еще меньшим углам предполагается применять установку ультрамалоуглового рассеяния SESANS, использующую кодировку угла рассеяния с помощью ларморовской прецесиии.

Для исследования многослойных структур предназначены рефлектометры. В плоскости рассеяния в этой методике используется сильная коллимация, позволяющая добиться высокого разрешения по Q в геометрии на отражение. В перпендикулярной плоскости предпочтительно использование фокусировки для повышения интенсивности нейтронного пучка на образце. Рефлектометр Nero снабжен кристаллический монохроматор с длиной волны 5.2 Å, в то время как рефлектометры SONATA и LIRA строятся с использованием времяпролетной методики. SONATA предназначена для исследования образцов с горизонтальной плоскостью рассеяния, а LIRA — с вертикальной. Боковые стенки нейтроной повода для рефлектометра SONATA должны быть покрыты m = 2 для работы в высокоинтенсивном режиме с горизонтальной фокусировкой пучка.

Спектрометры IN2 (трехосный) и CLEO (времяпролетный) предназначены для исследований различных типов низкоэнергетичных возбуждений и диффузионных процессов. Для повышения светосилы на подобных инструментах загрубляется разрешение в *Q*-пространстве, чему соответствует двойная фокусировка в реальном пространстве.

Для спин-эхо спектрометра NSE оптимальным является использование нейтронов с относительно большой длиной волны 15–25 Å, причем размещение нейтронной оптики внутри спин-эхо плеча приводит к сильному ухудшению энергетического разрешения. По этой причине расстояние от конца оптики до образца здесь составляет более 3 м.

Предполагается также создание двух установок для нужд фундаментальной физики. DEDM представляет из себя универсальную станцию для исследований в различных областях нейтронной физики. Инструмент β -распад предназначен для исследований одноименного явления. Нейтроноводы для установок фундаментальной физики оптимизировались из соображений максимальной плотности потока на выходе из нейтроновода.

Основные оптические данные по установкам сведены в табл. 4.1. Требования станций по расходимости условно разбиты на требования коллимации и фокусировки (монохроматором или нейтроноводом). Под коллимацией здесь понимается использование пучка с расходимостью меньшей или равной естественной расходимости нейтроновода, а под фокусировкой — необходимость дополнительно сжимать пучок перед образцом (для трехосного спектрометра IN2 горизонтальная фокусировка осуществляется на виртуальный источник). Часть результатов, связанных с определением и уточнением требований стан-

	Расходимость	Расходимость								
Инструмент	горизонталь-	вертикаль-	Спектр, Å							
	ная	ная								
Малоугловые установки										
SANS-2	K	K	4.5-20							
Тензор	K	K	4.5 - 20							
Мембрана	K	K	4.5 - 20							
SESANS	K	K	3-12							
Рефлектометры										
Nero	K	ФМ	5.2							
SONATA	K	ΦH	2 - 20							
LIRA	ΦH	K	2-20							
	Спектро	бметры								
IN2	ФН	ФМ	2.4 - 5.6							
CLEO	ΦH	ΦH	2-12							
NSE	K	К	8 - 25							
Фундаментальная физика										
DEDM	K	K	4.5-20							
β -распад	K	K	4.5 - 20							

Таблица 4.1. Инструменты, размещающиеся на канале ГЭК-3 реактора ПИК. К — коллимация, ФМ — фокусировка монохроматором, ФН — фокусировка нейтроноводом.

ций к нейтронным пучкам, опубликована в работах [A1,A2,A4].

На основании литературных данных и результатов Главы 3 были выбраны следующие типы нейтроноводов для различных инструментов. Для приборов фундаментальной физики и малоугловых инструментов, а также рефлектометра на кристаллическом монохроматоре Nero использовались нейтроноводы постоянного сечения. Для времяпролетных рефлектометров и всех спектрометров использовались нейтроноводы с концентраторами. Для рефлектометра с горизонтальным образцом LIRA было решено использовать нейтроноводтрансформер, позволяющий «повернуть» пучок вокруг собственной оси на 90°.

Также был рассмотрен вопрос о необходимых сечениях пучков. В случае инструментов, не требующих фокусировки, размер нейтроновода приводился в соответствие размеру образца. Так, для малоугловых инструментов в точечной геометрии сечение нейтроновода было принято 50×50 мм², для рефлектометров была принята ширина 30 мм.

Для приборов, применяющих фокусировку нейтроноводом, сечение определялось на основе данных из параграфа 3.4. Для горизонтальной фокусировки на трехосном спектрометре IN2 была принята ширина 80 мм, ограниченная наихудшим допустимым разрешением в *Q*-пространстве. Для Nero бралась максимальная доступная высота 200 мм. Использование на IN2 селектора скоростей в качестве фильтра высших гармоник ограничивает полезную высоту пучка значением 150 мм.

По своей геометрии приборы были условно разбиты на две группы. К «боковым», то есть занимающим достаточно большое пространство сбоку от образца, были отнесены: трехосный спектрометр IN2, рефлектометр Nero, а также времяпролетный спектрометр CLEO. Остальные приборы считались «прямыми».

4.1.2 Конфигурация нейтроноводной системы

На основе вышеперечисленного состава приборной базы и характеристик отдельных инструментов можно сформировать общий вид нейтроноводной системы ГЭК-3 реактора ПИК. Расположение приборов приведено на рис. 4.1. Там же показана ось канала ГЭК-3. Описание разработки конфигурации нейтроноводной системы содержится в работе [A5].

Хорошо видно, что почти все пространство нейтроноводного зала оказывается с одной стороны от этой оси, что значительно затрудняет размещение инструментов. Как следствие, два прибора (DEDM и IN2) были вынесены за пределы собственно нейтроноводного зала и размещены в кольцевом зале. Угол между между центральной осью нейтроноводного зала и осью ГЭК-3 составляет 4.5°. По этой причине приборы, использующие более короткие длины волн, такие как CLEO и времяпролетные рефлектометры, были размещены ближе к оси ГЭК-3, а приборы с потребностью в более холодных нейтронах, такие как малоугловые машины и NSE, оказались на заметном удалении от оси ГЭК-3. Такое решение позволило минимизировать потери полезного потока нейтронов при использовании изогнутых нейтроноводов.

В соответствии с принципами, изложенными в параграфе 3.1, для наиболее эффективного использования площади нейтроноводного зала «боковые» приборы были расположены вблизи друг друга. Так как спектрометр CLEO зани-



Рис. 4.1. Общий вид нейтроноводного зала реактора ПИК с планируемым размещением приборов на канале ГЭК-3. Красным показана ось канала.

Нейтроновод	Сечение, мм ²	Инструменты
H3-0	30×100	DEDM
H3-1	80×150	IN2
H3-2	30×200	Nero, SESANS
H3-3	60×200	CLEO, β -распад
H3-4	62×150	SONATA, LIRA
H3-5	50×200	SANS-2, Тензор, Мембрана, NSE

Таблица 4.2. Сечения 6 начальных нейтроноводов и размещаемые на них инструменты.

мает пространство не только с одной стороны от образца, но и частично с другой, возникает своеобразная геометрическая «тень» в направлении реактора, препятствующая размещению в ней сквозных нейтроноводов. Для рационального использования пространства «тени» там были размещены инструменты SESANS и β -распад, имеющие небольшие поперечные размеры.

Расстановка приборов производилась также в согласии с соображениями, сформулированными в параграфе 3.2: ближе всего к реактору оказались трехосный и времяпролетный спектрометры, далее времяпролетные рефлектометры, а на наибольшем удалении от источника нейтронов оказались малоугловые инструменты.

В табл. 4.2 приведена информация о размещении инструментов на 6 начальных нейтроноводах, а также приведены их стартовые сечения. Группировка инструментов по начальным нейтроноводам производилась по принципу схожести требований к нейтронным пучкам. Таким образом, рефлектометры SONATA и LIRA оказались объединены нейтроноводом H3-4, а малоугловые инструменты и спин-эхо спектрометр SEM — нейтроноводом H3-5. Объединение Nero и CLEO с SESANS и β -распадом соответственно основывалось на расположении инструментов в зале. Так как рефлектометр Nero использует фиксированную длину волны, возмущения, вносимые в нейтронный спектр наличием монохроматора, постоянны во времени, что позволяет разместить еще одну установку (SESANS) позади него. Высота нейтроновода CLEO может быть ограничена значением 140 мм, что позволяет выделить необходимое сечение для установки β -распад.

После определения общего вида нейтроноводной системы стало возможным

перейти к оптимизации отдельных нейтроноводов и нахождению их конкретных геометрических параметров. Конкретные задачи состояли в следующем:

- Определить радиусы кривизны изогнутых нейтроноводов, определить необходимость использования бендеров. Определить покрытия стенок нейтроноводов;
- 2. Определить геометрические параметры нейтроновода-трансформера для рефлектометра с горизонтальным образцом LIRA;
- 3. Оптимизировать концентраторы для инструментов, использующих фокусировку нейтроноводами.

4.2 Изогнутые нейтроноводы постоянного сечения

Изгиб нейтроноводов решает следующие основные задачи:

- Уход с прямой видимости в пределах каземата (вне нейтроноводного зала). Для всех нейтроноводов коэффициент запаса был выбран не менее k = 1.15.
- 2. Разведение пучков по установкам согласно их расположению в зале.
- 3. Ветвление нейтроноводов для умножения числа конечных позиций.
- 4. Сохранение высокой пропускающей способности по заданной части спектра при выполнении вышеуказанных пунктов.

Изгибались все нейтроноводы, кроме H3-1, обеспечивающего нейтронами спектрометр IN2. Установка IN2 располагается в кольцевом зале, таким образом фоновые условия нейтроноводного зала не ухудшаются. Для самого спектрометра такой недостаток как геометрическая прямая видимость реактора компенсируется рядом факторов, таких как: наличие селектора скоростей, блокирующего оптическую прямую видимость, использование кристаллического монохроматора, так что образец находится вне линии прямой видимости источника, относительная удаленность от реактора. Рассмотрим оптимизацию изогнутого нейтроновода на примере нейтроновода H3-0. Для заданной ширины нейтроновода (см. табл. 4.2) строилась зависимость интенсивности на образце (в случае H3-0 и установки фундаментальной физики DEDM — на выходе из нейтроновода) от радиуса изгиба. Покрытие всех стенок при этом принималось нереалистично большим m = 6. Зависимость строилась для минимальной рабочей длины волны, в данном случае $\lambda = 4.5$ Å. Результаты расчета приведены на рис. 4.2. Трансмиссия нейтроновода растет с увеличением радиуса кривизны (ср. с рис. 1.6).



Рис. 4.2. Интенсивность на выходе нейтроновода H3-0 в зависимости от радиуса кривизны.

Далее согласно формуле (1.13) определялся радиус, соответствующий уходу с прямой видимости для данного нейтроновода. В случае H3-0 он составлял R = 416 м, что в данном случае гарантирует хорошую трансмиссию. При учете положения прибора можно выяснить необходимый начальный угол нейтроновода относительно оси канала ГЭК-3 (с учетом необходимости размещения соседних нейтроноводов) и окончательно определить длину и радиус изогнутых участков нейтроновода. При необходимости использовалась S-образная конфигурация. Для H3-0 была определена следующая геометрия. Начальный угол нейтроновода составляет -8.4° . Нейтроновод изгибается вправо по ходу движения нейтронов радиусом R = 115 м на протяжении 10 м, далее следует прямой участок длиной 2 м.

Так как был получен достаточно маленький радиус кривизны, был также проверен вариант с использованием многоканального бендера. Для этого при фиксированном положении инструмента и конечной точки нейтроновода варьировалась длина изогнутой части, которая снабжалась различным числом каналов. Результаты расчетов приведены на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Пропускающая способность нейтроновода НЗ-0, снабженного бендерами с различным числом каналов, в зависимости от длины бендера.

Видно, что короткие бендеры (длиной 1–3 м) могут иметь трансмиссию сравнимую с обычным изогнутым нейтроноводом. В бендерах большей длины (4–10 м) увеличивается количество соударений нейтронов со стенками, что заметно снижает их эффективность. С практической точки зрения следует отдавать предпочтение одноканальным изогнутым нейтроноводам при наличии достаточного пространства. Единственным нейтроноводом, в котором используется бендер, оказался НЗ-ЗА, питающий спектрометр СLEO. Использование 2-канальной геометрии позволило обеспечить необходимую трансмиссию нейтронов с длиной волны 2 Å при заданных геометрических ограничениях.

После фиксации геометрических параметров, проводилась серия расчетов с изменением покрытия *m* на стенках нейтроновода. Для каждого нейтроновода независимо рассматривались левая и правая стенки прямого участка, внешняя стенка изогнутого участка, а также верхняя и нижняя стенки. Результаты для H3-0 приведены на рис 4.4. Видно что наибольшее значение *m* следует выбирать для внешней стенки на участке изгиба, а наименьшее — для внутренней. Покрытию боковых стенок на прямом участке нейтроновода соответствует промежуточное значение *m*.

Результаты оптимизации всех нейтроноводов сведены в табл. 4.3.



Рис. 4.4. Зависимость плотности потока на выходе нейтроновода H3-0 от покрытий стенок. Синим показана зависимость для верхней и нижней стенок, красным — для внешней стенки на участке изгиба, желтым — для внутренней на участке изгиба, фиолетовым — для боковых стенок прямого участка.

Наиболее разветвленным оказался нейтроновод H3-5, питающий 4 установки: малоугловые установки Тензор, Мембрана и SANS-2, а также спин-эхо спектрометр NSE. Схематическое изображение нейтроновода приведено на рис. 4.5. Показаны точки ветвления и направления отклонения ветвей (по часовой стрелке и против нее).

		DEDM	HOC + IN2		Nero	SESANS	ветвление А+В		$_{\rm HOC}+{ m CLEO}$		eta -pacııa $_{ m M}$	ветвление А+В		HOC + SONATA	трансформер + нос + LIRA	ветвление А+ВСD		SANS-2	ветвление ВС+D		NSE	ветвление В+С		Мембрана		Тензор
m_r	7	0	က	7		Η	2	0	0	က	2	2	0	2		2	2	2	0	0		2			0	1
m_l	က	2	က			Η	2	က	0	2	2	2	က	7	2	7	က	2					2			1
m_t	2	2	က	7	2	Η	က	က	က	2	0	က	က	က	က	က	2	2								1
радиус, м	115	8	8	-900	8	8	8	985	8	-985	8	8	1200	8	2200	8	1180	8	-1180	-700	8	-1180	1180	8	-1180	8
длина, м	10	2	15	25	IJ	3	က	22	27	26	6		41	18	26	c,	54	11	17	60	12	IJ	53	5	25	16
сечение, мм ²	30×100	30×100	80×150	30×200	30×200	30×30	60×200	60×140 (2 канала)	60×140	60×50	60×50	62×150	30×150	30×150	30×150	$50 \times 200 \rightarrow 50 \times 230$	50×50	50×50	50×170	50×50	50×50	50×110	50×50	50×50	50×50	50×50
$\alpha, ^{\circ}$	-8.4		-4.8	-0.5			+2.1					+5.05				+7.5										
нейтроновод	H3-0		H3-1	H3-2			H3-3	H3-3A		H3-3B		H3-4	H3-4A		H3-4B	H3-5	H3-5A		H3-5BCD	H3-5D		H3-5BC	H3-5B		H3-5C	

Таблица 4.3. Геометрическое описание нейтроноводов ГЭК-3 с указанием покрытия стенок. Отрицательным радиусам соответствует изгиб влево по ходу движения нейтронов, положительным — вправо.



Рис. 4.5. Схема ветвления нейтроновода H3-5. Показаны виды сверху и от реактора.

4.3 Оптимизация концентраторов нейтронных пуч-ков

Фокусировка с использованием нейтроновода применяется на 4 инструментах: в горизонтальной плоскости на трехосном спектрометре IN2, времяпролетном спектрометре CLEO и рефлектометре с горизонтальной плоскостью образца LIRA; в вертикальной плоскости — на CLEO и на рефлектометре с вертикальной плоскостью образца SONATA.

Вообще говоря, фокусирующая оптика является хроматической, то есть ее оптимальная форма для различных длин волн отличается. На рис. 4.6 представлен фактор выигрыша в потоке в зависимости от длины концентратора для различных длин волн по сравнению с нейтроноводом постоянного сечения для спектрометра CLEO. Выигрыш для малых длин волн гораздо заметнее, чем для больших: для 10 Å максимально возможный выигрыш составляет не более 1.7, тогда как для 2 Å — более 2.75. На рис. 4.6(b) зависимости для каждой длины волны были нормированы на собственные максимумы. Такое представление позволяет легко сравнить оптимальные длины концентратора для различных

93

длин волн. Для длины волны 2 Å максимум приходится на длину 5 м, для 5 Å - 2.5 м, а для 10 Å - 1.3 м. В качестве критерия для финальной оптимизации был выбран поток нейтронов с длиной 5 Å. В этом случае выигрыши для других длин волн составляют не менее 90% от максимально возможных. Для остальных инструментов оптимизация осуществлялась по всей используемой спектральной полосе.



Рис. 4.6. Зависимости выигрыша в потоке на образце CLEO от длины горизонтального концентратора. (а) Выигрыш от фокусировки для трех длин волн: 2 Å, 5 Å и 10 Å. (б) Каждая зависимость нормирована на собственный максимум.

Ранее в параграфе 3.4 было продемонстрировано превосходство полуэллиптических концентраторов над параболическими. Тогда для простоты фокус помещался точно в образец, а варьировалась только длина концентратора. В общем случае, эллиптический концентратор характеризуется не только длиной и положением правого фокуса, но и третьим свободным параметром — положением левого фокуса. Так как все три параметра сильно связаны друг с другом, для нахождения наилучшего их набора для каждого из инструментов использовалась оптимизация методом роя частиц. На рис. 4.7 изображена модель концентратора, использовавшаяся в оптимизации. Здесь d — характерный размер образца (для IN2 размер щели виртуального источника), L_d — расстояние от конца оптики до образца, f_l — расстояние от конца оптики до левого фокуса эллипса, f_r — расстояние от конца оптики до левого фокуса эллипса, При оптимизации покрытие носа характеризуется параметром m = 6. При изготовлении может использоваться постепенное увеличение параметра m со стороны основной части нейтроновода к образцу.



Рис. 4.7. Схема использовавшейся модели, для оптимизации геометрических параметров концентраторов. Здесь d — характерный размер образца, L_d — расстояние от конца оптики до образца, f_l — расстояние от конца оптики до левого фокуса эллипса, f_r — расстояние от конца оптики до правого фокуса, L_f — длина концентратора.

В табл. 4.4 сведены найденные параметры фокусирующих носов для каждого инструмента. Дополнительно указаны другие важные геометрические параметры: характерный размер образца и расстояние от конца нейтроновода до образца.

Инструмент	d, MM	L_d , MM	Спектр, Å	f_l, M	f_r , M	L_f , M				
Горизонтальная фокусировка										
IN2	10*	350	2.4 - 5.6	3.18	0.3	2.12				
CLEO	10/30	500	5	2.91/2.77	0.5/0.4	2.07/2.41				
LIRA	40	250	2-20	5.84	0.2	5.07				
	·	Вертик	сальная фоку	сировка						
CLEO	30	500	5	3.18	0.3	2.12				
SONATA	10	400	2-20	6.09	0.4	4.35				

Таблица 4.4. Описание нейтронных концентраторов, использующихся на различных инструментах. Расшифровка обозначений приведена в тексте и на рис. 4.7. Для IN2 указан размер щели виртуального источника вместо размера образца (отмечено звездочкой). Для горизонтальной фокусировки на CLEO указаны параметры для двух возможных размеров образца.

Оптимизированные концентраторы позволяют эффективно сжимать пучок в районе образца до заданных размеров. На рис. 4.8 представлено сечение пучка в районе фокуса на примере спектрометра IN2. Видно, как однородный пучок сжимается в районе виртуального источника, а затем расходится с двумя характерными гребнями. Гребни соответствуют двум максимумам, наблюдающимся в расходимости пучка после прохождения эллиптического носа и связаны с преимущественными отражениями от одной или другой стенки.



Рис. 4.8. Плотность потока нейтронного пучка в районе виртуального источника спектрометра IN2 в зависимости от поперечной (x) и продольной координат (z). Нейтроны движутся вдоль оси z.

4.4 Характеризация нейтроноводной системы

4.4.1 Сравнение с вариантом нейтроноводной системой 2014

Было проведено сравнение разработанной нейтроноводной системы с предлагавшимся ранее вариантом-2014, описанным в работе [71]. Для корректного сравнения варианта-2104 был полностью воссоздан средствами пакета McStas. Полученные оценки нейтронных потоков на выходах нейтроноводов хорошо совпадали с приведенными в работе [71]. Результаты сравнения полезных потоков на образце некоторых инструментов для двух проектов нейтроноводной системы приведены в табл. 4.5. Прямое сравнение для прочих приборов произвести невозможно, так как некоторые из них предполагалось установить на другом канале, другие используют неактуальную на сегодня геометрию рассеяния, а третьи вовсе отсутствуют.

Прибор	Выигрыш
IN2	$6.3~(5~{ m \AA}),~8.9~(3~{ m \AA})$
NeRo	2.5
SONATA	12.25 (20 Å), 25 (4 Å)
Мембрана	1.9
CLEO	4.8 - 9.5

Таблица 4.5. Таблица выигрыша в полезном потоке нейтронов на образцах установок для нейтроноводной системы, разработанной в данной работе, относительно варианта-2014.

Наибольшего выигрыша удалось добиться для приборов, использующих сильно расходящиеся пучки. Следует добавить, что в ряде случаев сечение пучков уменьшено по сравнению с вариантом-2014, что позволяет снизить фон на образце и увеличить соотношение полезный сигнал/шум.

4.4.2 Характеристики источника холодных нейтронов

Хотя оптимизационные расчеты нейтроноводов не очень сильно зависят от конкретных спектральных свойств источника холодных нейтронов (ИХН), для

получения достоверных абсолютных значений потоков на образцах установок необходимо иметь достаточно точную модель ИХН.

ИХН ГЭК-3 представляет собой сферу с внутренним диаметром 376 мм, заполненную жидким дейтерием. Расстояние между вертикальными осями активной зоны и ИХН составляет 780 мм (см. рис. 4.10). Для увеличения яркости холодных нейтронов в направлении ГЭК-3 используется вытеснитель сложной формы. Источник помещен в контейнер диаметром 436 мм. Подробное описание спектральных и геометрических параметров ИХН может быть найдено в [97].

Для нейтронно-оптических расчетов зачастую спектр яркости источника $I(\lambda)$ аппроксимируется суммой трех распределений Максвелла следующего вида (с подставленными фундаментальными константами):

$$I(\lambda) = \sum_{i=1}^{3} I_i 2\alpha_i^2 \lambda^{-5} \exp{-\frac{\alpha_i}{\lambda^2}},$$
(4.1)

где $\alpha_i = \frac{949}{T_i}$. Найденные свободные параметры I_i и T_i приведены в табл. 4.6.

Яркость, 10^{12} н/с/см 2 /ср	Температура, К
$I_1 = 5.38$	$T_1 = 204.6$
$I_2 = 2.50$	$T_2 = 73.9$
$I_3 = 9.51$	$T_3 = 23.9$

Таблица 4.6. Параметры, использованные для аппроксимации спектра яркости ИХН ГЭК-3.

В работе [97] приведены расчеты яркости источника для трех возможных ситуаций: штатная работа ИХН (холодный режим), теплый режим работы ИХН (в камере отсутствует жидкий дейтерий), ИХН и контейнер не установлены. Два последних варианта представляют практический интерес, так как при пуске реактора предполагается либо не устанавливать контейнер ИХН, либо установить его, но не снабжать собственно ИХН, что практически соответствует теплому режиму работы. Сравнение этих спектров приведено на рис. 4.9. В теплом режиме яркость на донышке ГЭК-3 существенно выше, чем при неустановленном контейнере, так как отсутствует дополнительный слой тяжелой воды. Иначе говоря, канал эффективно удлиняется, и его донышко оказывается ближе к максимуму плотности потока тепловых нейтронов в отражателе. Спектры для теплого режима и при отсутствующем контейнере были аппроксимирова-

Параметр	Теплый режим	Без контейнера
Яркость, 10^{12} н/с/см 2 /ср	22.5	7.05
Температура, К	312.2	306.4

Таблица 4.7. Параметры спектра яркости при теплом режиме работы ИХН и при отсутствии кожуха.

ны одиночным распределением Максвелла, найденные параметры приведены в табл. 4.7.



Рис. 4.9. (a) —спектры яркостей ИХН в теплом режиме и без контейнера; (б) — выигрыш относительно них при штатной работе ИХН.

К контейнеру ИХН примыкает канал ГЭК-3, имеющий донышко сечением $120 \times 200 \text{ мм}^2$ (ширина×высота) и постепенно расширяющийся до $320 \times 200 \text{ мм}^2$. Длина канала включая фланец составляет 967 мм. Далее в биологической защите установлен двухсекционный шибер. Нейтронную оптику возможно установить на минимальном расстоянии 1820 мм от донышка ГЭК-3.

Общий вид ИХН и ГЭК-3 представлен на рис. 4.10. Ось 20 задает направление на нейтроноводный зал, поэтому угол между ней и осью ГЭК-3, составляющий 7.5°, имеет важное практическое значение при проектировании нейтроноводной системы.

Интересно сравнить параметры ИХН ПИК с другими ведущими нейтронными центрами мира, что позволит в дальнейшем более обоснованно сравнивать расчетные потоки на образцах установок на ПИКе с их зарубежными аналогами. Для сравнения были выбраны реактор HFR в Институте Лауэ-Ланжевена



Рис. 4.10. Общий вид ИХН и ГЭК-3 реактора ПИК. АЗ — активная зона.

(ILL, Гренобль, Франция) и реактор FRM-II (Мюнхен, Германия). Первый из них оснащен двумя ИХН: вертикальным VCS и горизонтальным HCS.

Спектры яркости для всех источников брались на основе: для ILL — работ [98,99], для FRM-II — [26,62,92]. Сравнение яркостей приведено на рис. 4.11.

Можно видеть, что яркости ИХН ПИК и ILL VCS для $\lambda > 5$ Å отличаются незначительно (~ 10%), что объясняется общей схожестью конструкции. Источник HCS располагается существенно ближе к активной зоне по сравнению с ИХН ПИК (55 см против 78 см) и имеет меньший объем жидкого дейтерия (6 л против 23.8 л). Нейтроны из этого источника оказываются недомодерированы, но благодаря большему потоку тепловых нейтронов в центре источника достигается равенство яркостей для больших длин волн. Большое количество тепловых нейтронов обеспечивает сравнительно большую яркость источника для меньших длин волн. Источник FRM-II не полностью заполнен дейтерием, что снижает яркость в области холодных нейтронов.

Большое значение помимо яркости ИХН имеет плотность потока нейтронов на входе в нейтронно-оптические тракты. Эта величина зависит не только от яркости источника, но также от геометрических параметров канала, установ-

100



Рис. 4.11. Сравнение яркости ИХН ПИК и других реакторов: (a) — спектры яркостей источников; (б) — отношение яркости ИХН ПИК к другим реакторам.

параметр	ILL H1 (VCS)	ILL H5 (HCS)	FRM-II SR-1	ПИК ГЭК-3
$w \times h$, MM	140×220	d = 210	135×215	120×200
L, mm	2300	2155	1900	1820

Таблица 4.8. Геометрические параметры каналов, установленных на ИХН. Здесь *w* и *h* — ширина и высота донышка соответственно, *L* — расстояние от донышка канала до начала нейтроноводов. Для FRM-II приведена величина без учета внутриреакторной оптики.

ленного на ИХН. Эти параметры приведены в табл. 4.8.

Сравнение спектров плотности потоков на входе нейтроноводов приведено на рис. 4.12. Можно заметить, что за счет относительно небольшого расстояния от донышка канала до начала нейтронной оптики плотность потока нейтронов на ПИКе оказывается выше, чем на канале H1, установленном на аналогичном источнике ILL VCS.

Величина потока нейтронов на образцах установок при прочих равных зависит как от яркости источника (более важно для коллимированных пучков), так и от плотности потока на входе в нейтроновод (более важно для установок, использующих фокусировку), а также от «захватываемого» телесного угла, который в свою очередь зависит от покрытия и геометрии нейтроновода вблизи ИХН. Проигрыш ПИКа в области коротких длин волн может иметь косвенным следствием лучшие фоновые условия в нейтроноводном зале, а также меньшую

101



Рис. 4.12. Сравнение плотности потока нейтронов на входе в нейтроноводы реактора ПИК и других реакторов: (а) — плотности потоков; (б) — отношение плотности потока ПИК к другим реакторам.

радиационную нагрузку на защиту каземата.

В целом, можно заключить, что ИХН реактора ПИК является конкурентноспособным на фоне ИХН других реакторов, и можно ожидать эффективность приборов на том же уровне, что и в ILL и на FRM-II.

4.4.3 Сравнение нейтроноводной системы с зарубежными аналогами

В связи с тем, что спроектированная нейтроноводная система не введена в строй, ее непосредственная характеризация (сравнение расчетных потоков на выходах нейтроноводов с измеренными) пока невозможна. Вместо этого было проведено сравнение нейтроноводной системы с зарубежными аналогами: системами в ILL и на FRM-II. Сравнивались расчетные потоки на входе проектируемых нейтронных приборов на реакторе ПИК и известные из литературы измеренные потоки на входе аналогичных станций в указанных центрах. Указанные далее расчетные величины являются оценками сверху, так как не учитывают разрывов в нейтроноводах, воздушных промежутков, алюминиевых мембран и т.п.

В качестве эталонных малоугловых инструментов рассматривались D22 и D33 в ILL и KWS-1 и KWS-2 в MLZ. Плотность потока при использовании

селектора скоростей $\lambda = 4.5$ Å с монохроматичностью $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 10\%$ достигает 1.2×10^8 н/с/см² для D22, 4.1×10^7 для D33, 1.5×10^8 для KWS-1 и 2×10^8 для KWS-2. Для сравнения на ПИКе в тех же условиях будут достигнуты величины потоков 2.5×10^8 для Тензора, 2.2×10^8 для Мембраны и 5×10^8 для SANS-2. Последнее выдающееся значение связано с использованием суперзеркал m = 2.

Плотность потока нейтронов на образце рефлектометра D17 в ILL в режиме белого пучка с остановленными прерывателями составляет 9.6×10^9 н/с/см². На ПИКе для высокопоточного рефлектометра Соната в аналогичных условиях будет достигнута плотность 2.67×10^{10} н/с/см². Значительный выигрыш частично объясняется применением суперзеркального покрытия на боковых стенках нейтроновода.

Также было проведено сравнение светосилы для одного из спектрометров. Эталонным многодисковым времяпролетным спектрометром был избран IN5 в ILL, имеющий нейтронный поток на образце 5.16×10^5 н/с/см² при работе на монохроматической линии 5 Å с энергетическим разрешением 3%. Спектрометр CLEO при идентичной конфигурации прерывателей имел бы поток на образце 1.11×10^6 н/с/см².

Конечно, такое сравнение не дает полной информации о сравнительном качестве станций в различных центрах, но более детальное сравнение на основе литературных данных провести затруднительно. Тем не менее, ясно, что установки на ПИКе в целом не будут уступать зарубежным аналогам, а в ряде случаев — будут превосходить их по нейтронному потоку при прочих равных.

4.5 Перспективы исследований

Полученные в данной диссертации результаты могут служить базой для различных дальнейших исследований.

Разработка и уточнение параметров нейтронных установок, создаваемых на реакторе ПИК, продолжаются, что означает необходимость постоянного уточнения параметров нейтронной оптики. Например, в ближайшее время после уточнения параметров каскада прерывателей спектрометра CLEO возникнет задача оптимизации нейтронной оптики для фокусировки на щели дисковых прерывателей. В будущем любая модернизация нейтронной станции может сопровождаться соответственным улучшением оптики. На канале ГЭК-2 реактора ПИК планируется создание холодного источника нового типа на основе низкоразмерного «пальчикового» водородного замедлителя. Создание нейтроноводной системы ГЭК-2 является следующим логичным шагом развития приборной баз реактора ПИК и будет базироваться на опыте, приобретенном при создании системы на ГЭК-3. К основным особенностям будущей системы следует отнести небольшой размер замедлителя, что провоцирует трудности с освещением нейтроноводов, и необходимость биспектрального извлечения.

Представленная нейтроноводная система ГЭК-3 базируется на принципе «один прибор — один нейтроновод». Этот подход получил дальнейшее развитие в рамках проекта компактного источника ДАРЬЯ, где параметры работы протонного ускорителя «подгоняются» под нужды каждой станции или даже каждого эксперимента, причем каждый прибор снабжен индивидуальным оптимизированным замедлителем. Такой глубокой интеграции нейтронного инструмента с источником оказывается невозможно добиться в крупном центре, но она становится возможной при небольшом общем числе установок. Получаемые от такого сопряжения выигрыши оказываются достаточными для того, чтобы обеспечить работу компактного источника с требуемыми потоками на образцах установок.

4.6 Выводы

На основе разработанных ранее принципов и уточнения требований к оптике со стороны различных приборов был создан общий вид нейтроноводной системы реактора ПИК. Согласно предложенной в Главе 3 процедуре были проведены расстановка приборов в нейтроноводном зале и распределение их по 6 начальным нейтроноводам.

Для каждого изогнутого нейтроновода были найдены оптимальные геометрические параметры, обеспечивающие эффективный уход с прямой видимости и высокую пропускающую способность по необходимым длинам волн. Определены параметры покрытия стенок нейтроноводов.

Для инструментов, использующих фокусированные пучки, определены оптимальные параметры концентраторов с учетом размеров образцов и расстояния от оптики до образца.

Немаловажно, что при проектировании нейтроноводной системы удалось сохранить простоту технологических решений. Так, в системе почти не используются многоканальные бендеры, вертикально изогнутые нейтроноводы, а использование покрытий с высоким значением *m* ограничено короткими концентраторами.

Все созданные модели выложены в открытый доступ в репозиторий по адpecy github.com/Kkonikk/PIK_neutron_guide_system.

Характеризация системы показала, что найденная конфигурация обеспечивает нейтронные потоки сравнимые, а в некоторых случаях превосходящие зарубежные аналоги. Этот результат доказывает применимость и эффективность описанной в Главе 3 пошаговой процедуры разработки нейтроноводной системы.

Заключение

Основные результаты работы состоят в следующем:

- 1. Предложен общий принцип разработки нейтроноводных систем, позволяющий минимизировать общую длину нейтроноводов и повысить эффективность использования пространства нейтроноводного зала.
- 2. Проанализированы основные факторы потерь в нейтроноводах. Сделан вывод о предпочтительной расстановке инструментов для минимизации потерь.
- Показано, что для инструментов, использующих кристаллические монохроматоры с вертикальной фокусировкой, оптимальным является использование нейтроноводов постоянного сечения в сочетании с дополнительной фокусирующей оптикой между монохроматором и образцом.
- 4. Показано, что при использовании замедлителя большого размера с учетом технологических ограничений баллистические нейтроноводы проигрывают в трансмиссии коротковолновых нейтронов нейтроноводам постоянного сечения с концентраторами.
- 5. Проанализированы два варианта нейтроновода-трансформера: на основе восьмиугольного и винтообразного нейтроноводов. Сделан вывод о предпочтительности первого, несмотря на его несколько меньшую теоретическую эффективность.
- 6. С использованием разработанной пошаговой процедуры найдена конфигурация нейтроноводной системы реактора ПИК, обеспечивающая высокие нейтронные потоки на образцах установок физики конденсированного состояния. Проведена характеризация разработанной системы путем сравнения ее с предыдущим проектом и зарубежными аналогами.

Благодарности

В первую очередь благодарю Дашу и родителей за постоянную поддержку в работе и при подготовке рукописи. Эта работа была бы невозможна без огромной помощи всех ответственных за установки на реакторе ПИК, конструкторов, членов рекомендательных советов и многих других людей, участвующих в создании приборной базы реактора ПИК, а также моих ближайших коллег — Павлова К.А. и Киреенко Ю.М. Особенно благодарен своему научному руководителю, д.ф.-м.н. Григорьеву С.В., а также к.ф.-м.н. Москвину Е.В. и к.ф.-м.н. Иоффе А.И. за предоставленную тему и интерес к работе на всех ее этапах.

Литература

- [1] Гуревич И. И., Тарасов Л. В. Физика нейтронов низких энергий. 1965.
- [2] Varley F Sears. Neutron scattering lengths and cross sectioirn // Neutron News. - 1992. - Vol. 3, no. 3. - P. 29-37.
- [3] Turchin V.F. Diffraction of slow neutrons by stratified systems // Atomic Energy. - 1967. - Vol. 22, no. 2. - P. 124-125.
- [4] Поляризация нейтронного пучка при отражении от намагниченного зеркала / Г.М. Драбкин, Л.И. Окороков, А.Ф. Щебетов и др. // Журн. эксп. теор. физики. — 1975. — Т. 69. — С. 1916.
- [5] Multilayer Fe-Co mirror polarizing neutron guide / GM Drabkin, AI Okorokov, AF S'chebetov et al. // Nuclear Instruments and Methods. — 1976. — Vol. 133, no. 3. — P. 453–456.
- [6] Mezei F. Novel polarized neutron devices: supermirror and spin component amplifier // Communications on Physics (London). - 1976. - Vol. 1, no. 3. -P. 81-85.
- Mezei F, Dagleish PA. Corrigendum and first experimental evidence on neutron supermirrors // Communications on Physics (London). - 1977. - Vol. 2, no. 2. - P. 41-43.
- [8] Schanzer C, Schneider M, Böni P. Neutron Optics: Towards Applications for Hot Neutrons // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. — Vol. 746. — 2016. — P. 012024.
- [9] Springer T, Heidemann A. Maier-leibnitz and neutron optics // Neutron News. - 2002. - Vol. 13, no. 1. - P. 32-36.
- [10] Christ J, Springer T. Uber die Entwicklung eines Neutronenleiters am FRM-Reaktor // Nukleonik. — 1962. — Vol. 4. — P. 23–25.
- [11] Maier-Leibnitz H. Neutron conducting tubes // Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy. Proceedings of the International Symposium on Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy. — 1969.
- [12] Mezei F. Beam extraction and delivery at compact neutron sources // Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics C. -2016. -Vol. 38.
- [13] HERITAGE: the concept of a giant flux neutron reflectometer for the exploration of 3-d structure of free-liquid and solid interfaces in thin films / S Mattauch, A Ioffe, D Lott et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2017. -Vol. 841. -P. 34–46.
- [14] Carpenter JM, Mildner DFR. Neutron guide tube gain for a remote finite source // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1982. — Vol. 196, no. 2-3. — P. 341–348.
- [15] Allenspach Peter M, Boeni Peter, Lefmann Kim. Loss mechanisms in supermirror neutron guides // Neutron Optics / International Society for Optics and Photonics. — Vol. 4509. — 2001. — P. 157–166.
- [16] Zendler Carolin, Rodriguez D Martin, Bentley PM. Generic guide concepts for the European Spallation Source // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2015. - Vol. 803. - P. 89–99.
- [17] Maier-Leibnitz H., Springer T. The use of neutron optical devices on beam-hole experiments // Journal of Nuclear Energy. — 1963.
- [18] The macromolecular neutron diffractometer (MaNDi) at the Spallation Neutron Source, Oak Ridge: enhanced optics design, high-resolution neutron detectors and simulated diffraction / L Coates, AD Stoica, C Hoffmann et al. // Journal of Applied Crystallography. - 2010. - Vol. 43, no. 3. - P. 570-577.

- [19] Neutron guides at the FRM-II / H Aschauer, A Fleischmann, C Schanzer,
 E Steichele // Physica B: Condensed Matter. 2000. Vol. 283, no. 4. P. 323-329.
- [20] FIGARO: The new horizontal neutron reflectometer at the ILL / RA Campbell, HP Wacklin, I Sutton et al. // The European Physical Journal Plus. - 2011. --Vol. 126, no. 11. - P. 107.
- [21] Neutron guides on pulsed sources : Rep. / Science Research Council ; Executor: CJ Carlile, MW Johnson, WG Williams : 1979.
- [22] Copley JRD, Mildner DFR. Simulation and analysis of the transmission properties of curved-straight neutron guide systems // Nuclear science and engineering. - 1992. - Vol. 110, no. 1. - P. 1-9.
- [23] Characterization of a cold neutron beam from a curved guide / DFR Mildner, Huaiyu H Chen-Mayer, George P Lamaze, VA Sharov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 1998. - Vol. 413, no. 2-3. - P. 341-351.
- [24] Mildner D., Cook J. Curved-straight neutron guide system with uniform spatial intensity distribution // NIM A. -2008.
- [25] The concept of the new small-angle scattering instrument SANS-1 at the FRM-II / Ralph Gilles, Andreas Ostermann, Christian Schanzer et al. // Physica B: Condensed Matter. - 2006. - Vol. 385. - P. 1174-1176.
- [26] Radulescu A, Ioffe A. Neutron guide system for small-angle neutron scattering instruments of the Jülich Centre for Neutron Science at the FRM-II // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2008. Vol. 586, no. 1. P.55-58.
- [27] The RITA spectrometer at Risø—design considerations and recent results / KN Clausen, DF McMorrow, K Lefmann et al. // Physica B: Condensed Matter. - 1997. - Vol. 241. - P. 50–55.

- [28] Bourke M., Dunand D., Ustundag E. SMARTS a spectrometer for strain measurement in engineering materials // Applied Physics A. - 2002.
- [29] AMOR—the time-of-flight neutron reflectometer at SINQ/PSI / Mukul Gupta, T Gutberlet, J Stahn et al. // Pramana. - 2004. - Vol. 63, no. 1. - P. 57-63.
- [30] Mildner DFR. Multiple reflections within neutron optical devices // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 1990. - Vol. 292, no. 3. - P. 693-699.
- [31] Polarized reflectometer for the investigation of surface magnetism, the new polarized neutron reflectometer with polarization analysis at the Laboratoire Léon Brillouin / C Fermon, F Ott, G Legoff et al. // Review of Scientific Instruments. - 2000. - Vol. 71, no. 10. - P. 3797-3800.
- [32] Designing an elliptical supermirror guide for the high-pressure material science beamline of J-PARC / Hiroshi Arima, Kazuki Komatsu, Kazuaki Ikeda et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2009. Vol. 600, no. 1. P. 71–74.
- [33] ThALES—towards the next generation cold neutron three-axis spectrometer / M Boehm, S Roux, A Hiess, J Kulda // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. - 2007. - Vol. 310, no. 2. - P. e965–e967.
- [34] Hils T, Böni P, Stahn J. Focusing parabolic guide for very small samples // Physica B: Condensed Matter. - 2004. - Vol. 350, no. 1-3. - P. 166–168.
- [35] Study of the neutron guide design of the 4SEASONS spectrometer at J-PARC / Ryoichi Kajimoto, Kenji Nakajima, Mitsutaka Nakamura et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2009. Vol. 600, no. 1. P. 185–188.
- [36] Skoulatos M, Habicht K. Upgrade of the primary spectrometer of the cold tripleaxis spectrometer FLEX at the BER II reactor // Nuclear Instruments and

Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2011. -Vol. 647, no. 1. - P. 100-106.

- [37] Komarek AC, Böni P, Braden M. Parabolic versus elliptic focusing– Optimization of the focusing design of a cold triple-axis neutron spectrometer by Monte-Carlo simulations // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2011. - Vol. 647, no. 1. - P. 63-72.
- [38] Böni Peter. New concepts for neutron instrumentation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2008. - Vol. 586, no. 1. - P. 1-8.
- [39] Janoschek M, Böni P, Braden M. Optimization of elliptic neutron guides for triple-axis spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2010. - Vol. 613, no. 1. - P. 119-126.
- [40] Optimal shape of a cold-neutron triple-axis spectrometer / Kim Lefmann, U Filges, F Treue et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2011. -Vol. 634, no. 1. -P. S1–S6.
- [41] New neutron-guide concepts and simulation results for the POWTEX instrument / Andreas Houben, Werner Schweika, Thomas Brückel, Richard Dronskowski // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2012. Vol. 680. P. 124–133.
- [42] A long ballistic supermirror guide for cold neutrons at ILL / H Häse, A Knöpfler, K Fiederer et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2002. - Vol. 485, no. 3. - P. 453-457.
- [43] Characterization of a ballistic supermirror neutron guide / Hartmut Abele, D Dubbers, H Häse et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2006. - Vol. 562, no. 1. - P. 407-417.

- [44] Ito Takeyasu M, Crawford Christopher B, Greene Geoffrey L. Optimization of the ballistic guide design for the SNS FNPB 8.9 Å neutron line // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2006. Vol. 564, no. 1. P. 414–423.
- [45] Primary spectrometer neutron optics simulations for a new cold neutron backscattering spectrometer / HN Bordallo, B Frick, H Schober, T Seydel // Journal of Neutron Research. - 2008. - Vol. 16, no. 1-2. - P. 39–54.
- [46] Advanced geometries for ballistic neutron guides / Christian Schanzer, Peter Böni, Uwe Filges, Thomas Hils // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2004. -Vol. 529, no. 1-3. -P. 63–68.
- [47] Ibberson Richard M. Design and performance of the new supermirror guide on HRPD at ISIS // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – Vol. 600, no. 1. – P. 47–49.
- [48] Eliminating line of sight in elliptic guides using gravitational curving / Kaspar H Klenø, Peter K Willendrup, Erik Knudsen, Kim Lefmann // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2011. - Vol. 634, no. 1. - P. S100-S103.
- [49] Böni Peter. High intensity neutron beams for small samples // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. - Vol. 502. - 2014. - P. 012047.
- [50] Zendler C, Nekrassov D, Lieutenant K. An improved elliptic guide concept for a homogeneous neutron beam without direct line of sight // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2014. - Vol. 746. - P. 39-46.
- [51] Cussen Leo D, Krist Thomas, Lieutenant Klaus. A new guide concept for a homogenous neutron beam without direct line of sight // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2015. - Vol. 777. - P. 6-14.

- [52] Correction of optical aberrations in elliptic neutron guides / Phillip M Bentley, Shane J Kennedy, Ken H Andersen et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2012. - Vol. 693. - P. 268-275.
- [53] Multiple reflections in elliptic neutron guide tubes / LD Cussen, D Nekrassov, C Zendler, K Lieutenant // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2013. - Vol. 705. - P. 121-131.
- [54] Systematic performance study of common neutron guide geometries / Kaspar Hewitt Klenø, Klaus Lieutenant, Ken H Andersen, Kim Lefmann // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2012. - Vol. 696. -P. 75-84.
- [55] Gaehler R // Neutron Delivey Systems, talk. 2007.
- [56] Füzi János, Rosta László. Neutron Beam Conditioning for Focusing SANS Spectrometers // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. — Vol. 251. — 2010. — P. 012075.
- [57] Maier B. Neutron Beam Facilities at the HFR available for Users // ILL, Grenoble.-1977.
- [58] The H5 guide system—the latest innovative guide system at the ILL / Jérôme Beaucour, Michael Kreuz, Martin Boehm et al. // Neutron News. 2015. -Vol. 26, no. 3. -P. 11–14.
- [59] Boffy Romain. Design of a new neutron delivery system for high flux source : Ph. D. thesis / Romain Boffy ; Universidad Politécnica de Madrid; Institut Laue-Langevin, Grenoble, France. – 2016.
- [60] Anderson I, Atchison F. SINQ guide concept // INSTITUTE OF PHYSICS CONFERENCE SERIES / IOP PUBLISHING LTD DIRAC HOUSE, TEMPLE BACK, BRISTOL BS1 6BE, ENGLAND. - No. 97. - 1989. -P. 837-841.

- [61] Design and set-up of the neutron guides at FRM-II : Rep. ; Executor: E Steichele, C Schanzer : 2001.
- [62] Measurement of neutron flux and beam divergence at the cold neutron guide system of the new Munich research reactor FRM-II / K Zeitelhack, C Schanzer, A Kastenmüller et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2006. - Vol. 560, no. 2. - P. 444-453.
- [63] Design of neutron-guide systems at the Australian replacement research reactor / SJ Kennedy, BA Hunter, F Mezei, L Rosta // Applied Physics A. – 2002. – Vol. 74, no. 1. – P. s40–s42.
- [64] Rodriguez D Martin, Kennedy SJ, Klose F. Upgrade of the neutron guide system at the OPAL Neutron Source // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. – Vol. 251. – 2010. – P. 012065.
- [65] Report on the repair of the opal neutron beam transport system / Stewart Pullen, Gene Davidson, S Pangalis et al. // Joint IGORR 2013 and IAEA Technology Meeting. - 2013.
- [66] Krist Th, Tennant A. Guide and Instrument Upgrade at Helmholtz-Zentrum Berlin // Neutron News. - 2014. - Vol. 25, no. 2. - P. 4-7.
- [67] Cook JC. Design and estimated performance of a new neutron guide system for the NCNR expansion project // Review of Scientific Instruments. -2009. Vol. 80, no. 2. P. 023101.
- [68] A neutron guide installation status and its first performance test result at KAERI / SJ Cho, YG Cho, CH Lee et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2011. - Vol. 634, no. 1. - P. S67-S70.
- [69] Кудряшов В.А., Булкин А.П., Кезерашвили В.Я. Нейтроноводная система реактора "ПИК" // Препринт, Рос. акад. наук, Петерб. ин-т ядер. физики. — 1978.
- [70] Кудряшов В. А. Исследование нейтроноводных систем, методы расчета и эксперимент : Дисс... кандидата наук / В. А. Кудряшов ; ЛИЯФ. 1984.

- [71] Расчет нейтронных потоков на выходах нейтроноводных каналов высокопоточного исследовательского реактора ПИК / А. А. Булкин, А. П. Булкин, Д. С. Головастов и др. // Препринт ПИЯФ. — 2014. — № 2958.
- [72] Neutronenleiter / B Alefeld, J Christ, D Kukla et al. // JUL-294-NP. 1965.
- [73] Dubbers D. The transmission of a lossy curved supermirror neutron guide // NIM A. -1994.
- [74] Mildner DFR. Neutron gain for converging guide tubes // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. — 1982. — Vol. 200, no. 2-3. — P. 167–173.
- [75] Copley J. An analytical method to characterize the performance of multiple section straight-sided neutron guide systems // NIM A. -1990.
- [76] Mildner D. Acceptance diagrams for curved neutron guides // NIM A. -1990.
- [77] Copley JRD. Transmission properties of short curved neutron guides: Part I. Acceptance diagram analysis and calculations // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1995. — Vol. 355, no. 2-3. — P. 469–477.
- [78] Global optimization of an entire neutron guide hall / Phil M Bentley, Peter Fouquet, Martin Böhm et al. // Journal of Applied Crystallography. – 2011. – Vol. 44, no. 3. – P. 483–488.
- [79] Seeger Philip A, Daemen Luke L. The neutron instrument simulation package, NISP // Advances in Computational Methods for X-Ray and Neutron Optics / International Society for Optics and Photonics. – Vol. 5536. – 2004. – P. 109– 124.
- [80] Lee W-T, Wang X-L. IDEAS: A general purpose software package for simulating neutron scattering instruments // Neutron News. — 2002. — Vol. 13, no. 4. — P. 30–34.
- [81] Šaroun J, Kulda J. Monte Carlo ray-tracing code for RESTRAX // Neutron News. - 2002. - Vol. 13, no. 4. - P. 15–19.

- [82] VITESS: Virtual instrumentation tool for pulsed and continuous sources / D Wechsler, G Zsigmond, F Streffer, F Mezei // Neutron News. — 2000. — Vol. 11, no. 4. — P. 25–28.
- [83] VITESS 3-Virtual Instrumentation Tool for the European Spallation Source / C Zendler, K Lieutenant, D Nekrassov, M Fromme // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. - Vol. 528. - 2014. - P. 012036.
- [84] Lefmann Kim, Nielsen Kristian. McStas, a general software package for neutron ray-tracing simulations // Neutron news. — 1999. — Vol. 10, no. 3. — P. 20–23.
- [85] Willendrup Peter, Farhi Emmanuel, Lefmann Kim. McStas 1.7-a new version of the flexible Monte Carlo neutron scattering package // Physica B: Condensed Matter. - 2004. - Vol. 350, no. 1. - P. E735-E737.
- [86] Farhi E, Debab Y, Willendrup P. iFit: A new data analysis framework. Applications for data reduction and optimization of neutron scattering instrument simulations with McStas // Journal of Neutron Research. — 2014. — Vol. 17, no. 1. — P. 5–18.
- [87] Bentley Phillip M, Andersen Ken H. Optimization of focusing neutronic devices using artificial intelligence techniques // Journal of Applied Crystallography. — 2009. — Vol. 42, no. 2. — P. 217–224.
- [88] Optimization of multi-channel neutron focusing guides for extreme sample environments / DD Di Julio, E Lelièvre-Berna, P Courtois et al. // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. – Vol. 528. – 2014. – P. 012006.
- [89] Eberhart Russell, Kennedy James. A new optimizer using particle swarm theory // Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on / IEEE. - 1995. - P. 39-43.
- [90] Bertelsen Mads, Lefmann Kim. Constraining neutron guide optimizations with phase-space considerations // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2016. - Vol. 830. - P. 313-324.
- [91] Validation of Monte-Carlo simulations with measurements at the ICON beamline at SINQ / L Giller, U Filges, G Kühne et al. // Nuclear Instruments and

Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2008. -Vol. 586, no. 1. -P. 59–63.

- [92] Radulescu Aurel, Pipich Vitaliy, Ioffe Alexander. Quality assessment of neutron delivery system for small-angle neutron scattering diffractometers of the Jülich Centre for Neutron Science at the FRM II // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2012. Vol. 689. P. 1–6.
- [93] Numerical calculation of neutron fluxes at the exit of a complex neutron-guide system at IRI, Delft / VM Pusenkov, A Schebetov, HPM Gibcus et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. -2002. Vol. 492, no. 1-2. P. 105–116.
- [94] Формирователь нейтронного пучка для рефлектометра "РЕВЕРАНС"с вертикальной плоскостью рассеяния / АФ Щебетов, ГП Гордеев, ИМ Лазебник и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2017. — № 10. — С. 3–10.
- [95] Канторович Л.В. Математические методы в организации и планировании производства. 1939.
- [96] Jarnik OV, Kössler O. O minimalnich oratech obsakujicich u danych body // Casopis Pesk. Mat. Fyz. – 1934. – Vol. 63. – P. 223–235.
- [97] Нейтронно-физические расчеты источника холодных нейтронов ГЭК-3 реактора ПИК / В.А. Митюхляев, М.С. Онегин, Д.Г. Маркушин и др. // Препринт ПИЯФ. — 2014. — № 2959.
- [98] Ageron Paul. Cold neutron sources at ILL // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 1989. - Vol. 284, no. 1. - P. 197-199.
- [99] Farhi E. Global guide study for cold and thermal guides Ladi3@ H112 guide simulation: effect of a double curved guide. - 2004.