

На правах рукописи



**Гилев Александр Георгиевич**

**МОДЕРНИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ  
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

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

<b>Научный руководитель</b>	<b>Явор Михаил Игоревич</b> , доктор физико–математических наук, главный научный сотрудник лаборатории оптики заряженных частиц и математического моделирования ФГБУН «Института аналитического приборостроения Российской Академии наук» (ИАП РАН), г. Санкт-Петербург
<b>Официальные оппоненты</b>	<b>Калимов Александр Гелиевич</b> , доктор технических наук, доцент, профессор высшей школы высоковольтной энергетики института энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого» (СПбПУ), г. Санкт-Петербург <b>Боднарчук Виктор Иванович</b> , кандидат физико-математических наук, заместитель начальника отдела НЭОКС ИБР-2 лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна
<b>Ведущая организация</b>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), г. Санкт-Петербург

Защита состоится

«01» июля 2020 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» и на официальном сайте университета [www.rsreu.ru](http://www.rsreu.ru). Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.211.03, к. ф.-м. н., доцент



В. Г. Литвинов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность диссертационной работы

В последние годы происходит активное развитие технологий создания ультратонких слоев и многослойных структур, являющихся основой для разработки элементов наноэлектроники [1], используемых в свою очередь, при создании устройств магнитной записи и хранения информации, в сенсорах давления, магнитного поля, датчиков ионизирующего излучения и т.п.

Создание материалов и разработка принципиально новых наносистем требует развития современных методов их исследований и анализа. Нейтронное излучение находит широкое применение при исследованиях характеристик материалов благодаря слабому поглощению нейтронов веществом, наличию у нейтрона магнитного момента, а также благодаря отличию значений амплитуд рассеяния нейтронов на ядрах различных элементов и изотопов.

Нейтронная рефлектометрия возникла как метод исследования поверхности с помощью полного отражения нейтронов от среды. Затем она начала применяться для исследований слоистых структур при использовании брэгговского отражения нейтронов от периодической структуры. В настоящее время объектом ее исследований становятся сложные слоистые структуры и бислои с тонкими слоями, слоями с неоднородной структурой, изменяющимися толщиной и свойствами, а также слоями из «мягких» материалов (полимеры, биоструктуры, гели, жидкости). В этих структурах зеркальное отражение нейтронов сопровождается диффузным рассеянием на неупорядоченных объектах (кластеры, неоднородности на границах, частицы в объеме слоя) и неупругим рассеянием на возбуждениях среды. Таким образом, нейтронная рефлектометрия сейчас уже занимается исследованием структуры и динамики реальной слоистой структуры во всем ее многообразии, регистрируя все виды ядерного и магнитного рассеяния нейтронов, существующие в широком диапазоне вектора рассеяния. Дополнительные возможности применения нейтронов открываются в области исследований слоистых наноструктур в связи с разработанными недавно методами, основанными на использовании стоячих волн. Так, было показано, что из-за слабого поглощения возможно усиление плотности нейтронной волны на несколько порядков. Это делает нейтронное излучение

незаменимым для изучения слабомагнитных материалов. Новые возможности для исследования доменного магнитного состояния открывает использование явления расщепления нейтронной волны в магнито-неколинеарном и осциллирующем магнитных полях. Информативность нейтронной рефлектометрии при исследованиях магнитной-ядерной неоднородной структуры существенно выросла в последнее время благодаря регистрации диффузно-рассеянных поляризованных нейтронов [2].

Для работы с поляризованными нейтронными пучками используют в основном следующие устройства: поляризаторы нейтронных пучков, анализаторы поляризации нейтронных пучков, нейтронные рефлектометры, различного типа электромагниты. Основной из составляющих эти устройства частей является магнитная система для поляризации нейтронного пучка.

Максимально возможная поляризующая эффективность достигается с магнитной системой, создающей однородное поле в большом объеме для того, чтобы упорядочить магнитные моменты в поляризующих покрытиях. С улучшением поляризующих нейтронных покрытий требования к магнитным системам повышаются. Для уменьшения вероятности отражения нейтронов с переворотом спина необходимо обеспечить коллинеарность магнитных моментов в слоях суперзеркала. По имеющимся экспериментальным данным, величина индукции магнитного поля при этом должна быть не менее  $40\div 70$  мТл. Также требуется минимизировать габариты магнитной системы, например, чтобы вписать ее в существующие габариты установки, максимально приблизить магнитную систему к позиционно-чувствительному детектору (ПЧД) для сохранения разрешения установки и т. д.

Анализ существующих магнитных систем на основе постоянных магнитов и электромагнитов для нейтронных рефлектометров показал, что описанные в литературных источниках образцы представляют собой либо морально устаревшие и не имеющие актуальной значимости разработки [3], либо не отвечающие заданным требованиям, касающимся размеров зоны однородности, значения индукции магнитного поля, отклонения вертикальной составляющей магнитной индукции и массогабаритов [4,5]. Таким образом, **актуальной** является задача модернизации магнитных систем для рефлектометров поляризованных нейтронов.

## **Цели и задачи диссертационной работы**

Возможность улучшения характеристик магнитных систем обусловлена как появлением современных магнитотвердых и магнитомягких материалов, так и развитием методов проектирования их конфигураций. Разработка на основе этих возможностей модернизированных систем формирования в большом объеме однородного магнитного поля для рефлектометров поляризованных нейтронов и является **целью** диссертационной работы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- определить необходимую зону однородности и величину индукции магнитного поля для оптических систем современных рефлектометров;
- исследовать возможность использования широкоапертурных магнитных сборок, то есть комбинаций магнитомягких и магнитотвердых материалов;
- минимизировать использование магнитных материалов за счет примененияборок;
- минимизировать краевые эффекты неоднородности индукции магнитного поля.

Решение указанных задач позволило в настоящей диссертационной работе предложить конструкции компактных магнитных систем на основе постоянных магнитов и электромагнитов для создания индукции магнитного поля требуемой величины и однородности в оптической части поляризаторов и анализаторов нейтронных рефлектометров, в том числе используемых совместно с ПЧД широкоугольных анализаторов, у которых рабочая область с суперзеркальными каналами занимает весьма значительный объем.

Предложенные подходы также применимы для создания широкоапертурных магнитных систем в приборах другого применения. В качестве примера в работе приведена магнитная система для расходомера многофазных текучих сред.

## **Научная новизна:**

- предложена компоновка широкоапертурных магнитных систем для рефлектометров поляризованных нейтронов на основе применения магнитныхборок, то есть комбинаций магнитомягких и магнитотвердых материалов;

- обосновано применение в сборках магнитотвердых материалов (на основе NdFeB), ранее не использовавшихся в аналогичных магнитных системах;
- разработаны способы минимизации краевых эффектов неоднородности индукции магнитного поля в системах для рефлектометров поляризованных нейтронов;
- показана возможность уменьшения массогабаритных показателей магнитных систем рефлектометров поляризованных нейтронов.

### **Практическая значимость**

На основе предложенных в работе методов разработаны и созданы магнитные системы для:

- нейтронного многоканального веерного широкоапертурного анализатора рефлектометра “Magnetism Reflectometer” импульсного нейтронного источника SNS (ОНЛ, США);
- нейтронного анализатора рефлектометра РЕМУР реактора ИБР-2 (ЛНФ ОИЯИ, Дубна);
- формирователя пучка рефлектометра поляризованных нейтронов (РПН) реактора ИР-8 (НИЦ КИ, Москва);
- формирователя пучка нейтронного рефлектометра NeRo реактора ПИК (НИЦ КИ-ПИЯФ, Гатчина);
- веерного анализатора рефлектометра NeRo реактора ПИК (НИЦ КИ-ПИЯФ, Гатчина);
- электромагнита узла образца рефлектометра поляризованных нейтронов (РПН) реактора ИР-8 (НИЦ КИ, Москва).

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- магнитные сборки на основе комбинаций магнитотвердых и магнитомягких материалов позволяют создавать в магнитных системах рефлектометров поляризованных нейтронов поле со значением индукции до 90 мТл и отклонением значения его вертикальной составляющей не более чем 5% в объеме до 9000 см<sup>3</sup>, при минимальном внешнем объеме магнитной системы до 37000 см<sup>3</sup>.

- магнитные сборки на торцах магнитных систем рефлектометров поляризованных нейтронов позволяют снизить влияние краевых эффектов, т. е. уменьшить расстояние от торца системы до начала зоны однородности до 2-х раз.

- профиль полюсных наконечников в виде Т-образного выступа в центральной части и расположение катушек намагничивания симметрично в непосредственной близости от рабочей зоны позволяют создавать электромагниты рефлектометров поляризованных нейтронов с повышенными требованиями к величине индукции магнитного поля до 200 мТл и отклонением значения его вертикальной составляющей не более 2%.

### **Апробация результатов**

Результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, докладывались на Конференции по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2018 (СПб).

В целом работа докладывалась на научных семинарах отделения нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ (Гатчина).

### **Степень достоверности**

Достоверность полученных в работе результатов обеспечена применением современных математических методов расчета магнитных систем, корректным построением измерительных схем тестирования этих систем, значительным объемом тестовых экспериментов и совпадением полученных экспериментальных результатов с расчетными данными.

**Личный вклад автора** в диссертационную работу состоит в:

- анализе литературных источников по теме диссертации;
- предложении методов использования новых компоновок магнитных систем для рефлектометров поляризованных нейтронов, в том числе комбинаций магнитомягких и магнитотвердых материалов, использования магнитотвердых материалов (на основе NdFeB), способов минимизация краевых эффектов магнитных систем;

- проведении экспериментального анализа магнитотвердых материалов, применяемых для построения магнитных систем рефлектометров поляризованных нейтронов;
- выполнении анализа и обобщения результатов полученных данных;
- непосредственном участии в измерениях характеристик магнитных систем анализатора и формирователя рефлектометра “NeRo”, формирователя нейтронного пучка для рефлектометра РПН, электромагнита узла образца РПН;
- непосредственном участии в измерениях и обсуждении характеристик ранее созданных магнитных систем нейтронного рефлектометра НР-4М с целью их замены в будущем.

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы изложены в 5 печатных работах в периодических научных изданиях, из них 3 работы в изданиях, включенных ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, из которых 2 в издании, входящем в Международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения общим объемом 110 страниц машинописного текста, содержит 6 таблиц и 51 рисунок, список литературы из 47 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** сформулированы актуальность, цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость, а также приведены основные положения, выносимые на защиту, обоснование достоверности и описана структура диссертации.

**Первая глава** посвящена современному состоянию рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН). Показано, что метод РПН за последние 30 лет получил широкое распространение и продолжает интенсивно развиваться как за счет развития методик, так и создания более эффективной нейтронной техники. Показаны



уникальные возможности метода РПН и его уникальность для проведения исследований сложных магнитных наноструктур, пригодных для разработки принципиально новых элементов и устройств в нанoeлектронике, электротехнике и других областях науки и техники. Показаны примеры нейтронной техники для рефлектометрии поляризованных нейтронов, а именно: поляризаторы нейтронных пучков, веерные анализаторы поляризации, рефлектометры нейтронов на источнике нейтронов непрерывного действия. На примере нейтронного рефлектометра НР-4М (НИЦ КИ-ПИЯФ, Гатчина) показано, что его конструктив включает в себя множество магнитных систем.

Исходя из сравнения существующих магнитных систем предыдущих разработок с требованиями, предъявляемыми к современным рефлектометрам, показано, что принципы их построения, компоновка, а также материалы, используемые при их изготовлении, требуют обновления. Отмечено, что при разработке устройств с улучшенными поляризующими нейтронными покрытиями требования к магнитным системам постоянно повышаются. Появляется необходимость в минимизации габаритов магнитных систем, уменьшении энергопотребления (касаемо электромагнитов), уменьшении расхода необходимых магнитомягких и магнитотвердых материалов (ввиду их дороговизны), максимальном приближении магнитной системы к позиционно-чувствительному детектору (ПЧД) для сохранения разрешения установки и т.п.

В первой главе проведен анализ магнитотвердых и магнитомягких материалов. Выделены их основные свойства и характеристики. Приведена классификация магнитотвердых и магнитомягких материалов.

Сформулированы основные требования к магнитомягким и магнитотвердым материалам при проектировании магнитных систем. Выбраны подходящие материалы для создания магнитных систем рефлектометров поляризованных нейтронов:

- наиболее подходящим магнитомягким материалом при разработке данного класса магнитных систем является *технически чистое железо* (низкоуглеродистая электротехническая сталь) или *АРМКО-железо*.
- наиболее подходящим магнитотвердым материалом при разработке данного класса магнитных систем является *неодим-железо-бор (NdFeB)*.

Предложен новый метод формирования магнитного поля в системах для современных рефлектометров поляризованных нейтронов – использование сочетания магнитотвердых и магнитомягких материалов в магнитных сборках.

Определена возможность минимизации использования магнитомягких и магнитотвердых материалов за счет применения в конструктиве магнитныхборок.

Описаны основные преимущества применения магнитныхборок в магнитных системах для рефлектометров поляризованных нейтронов.

Проведена классификация магнитныхборок, выбран необходимый класс сборки и выделены его основные преимущества.

**Во второй главе** показана практическая реализация нового метода формирования магнитного поля в широкоапертурных магнитных системах – применение магнитныхборок.

На основе указанного метода рассчитаны магнитные системы для современных приборов, а именно:

- Магнитная система веерного анализатора нейтронного рефлектометра NeRo;
- Магнитная система формирователя для нейтронного рефлектометра NeRo;
- Магнитная система нейтронного многоканального веерного широкоапертурного анализатора для рефлектометра «Magnetism Reflectometer»;
- Магнитная система нейтронного анализатора рефлектометра РЕМУР;
- Магнитная система формирователя пучка нейтронного пучка для рефлектометра РПН;
- Магнитная система для расходомера многофазных текучих сред.

На примере магнитной системы веерного анализатора рефлектометра NeRo показаны типичные требования к магнитной системе, а именно: в рабочей области 200 (длина) x 110 (высота) x 220 (ширина) мм<sup>3</sup> с суперзеркалами для полного насыщения магнитных слоев величина поля должна быть не менее 65 мТл, отклонение значения вертикальной составляющей магнитной индукции не должно превышать 5%. При этом магнитная система должна быть компактной и автономной (не требует электропитания).

На рисунке 1 представлен внешний вид и приведены габариты магнитной системы (синий цвет – магнитотвердые материалы, серый – магнитомягкие материалы), оптимизированной с помощью проведенных численных расчетов.

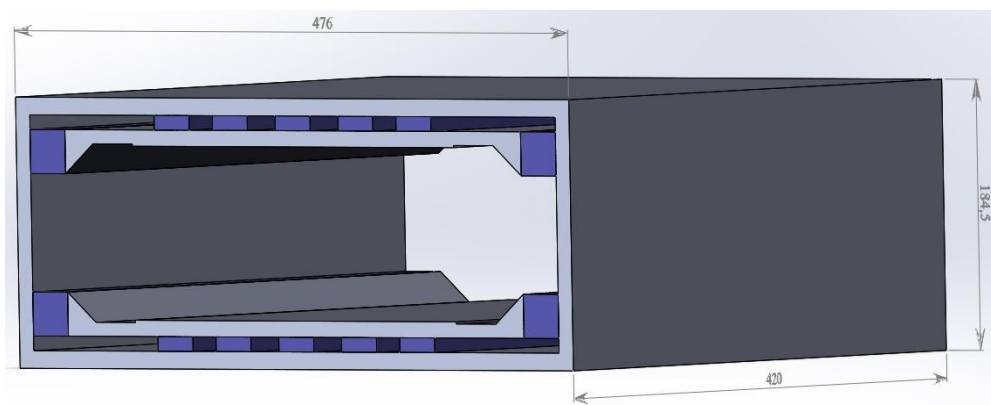


Рис. 1 Внешний вид и габариты магнитной системы, определенные с помощью проведенных численных расчетов.

Магнитные элементы, используемые в магнитной системе отличаются простейшей формой (прямоугольный параллелепипед) и не нуждаются в дополнительной механической обработке, что является существенным фактором снижающим стоимость конечного изделия за счет отказа от дорогостоящей резки постоянных магнитов, требующей специализированной оснастки, разрушающей защитное покрытие, и т. п.

На рисунке 2 показан общий вид магнитной системы, с линиями 1 и 2 вдоль которых произведен расчет распределения индукции, результат который представлен на рисунке 3 (с указанием рабочей области с необходимой однородностью поля в ней), соответственно.

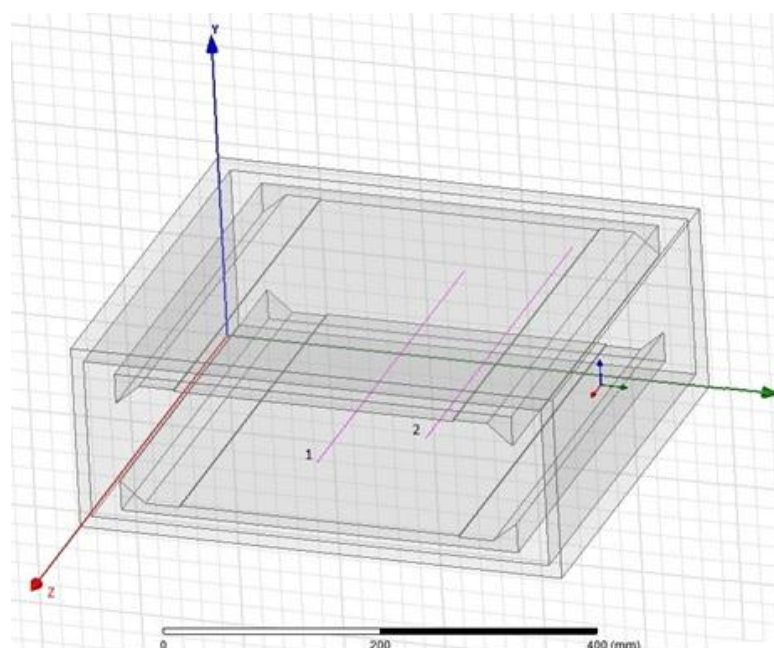
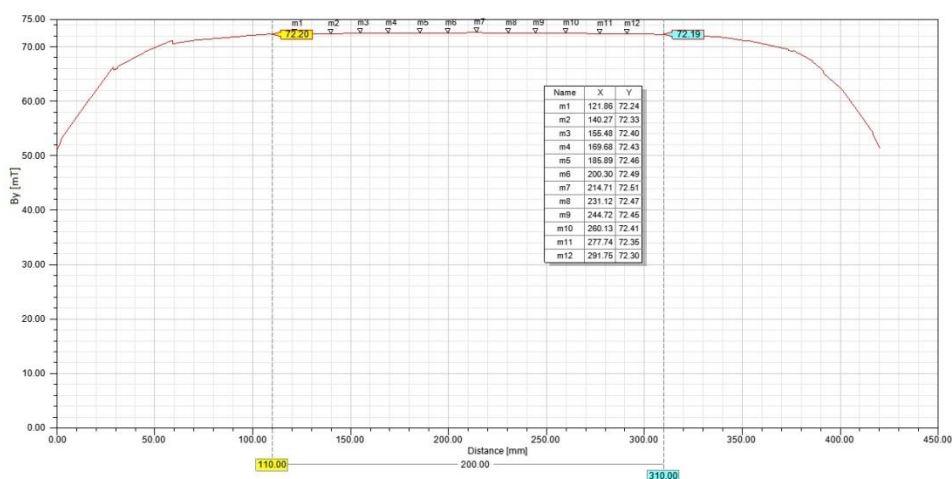


Рис.2 Общий вид магнитной системы, полученный из расчета.



Рабочая область

Рис.3 Распределение Y-составляющей индукции магнитного поля в центре системы вдоль ее длины в рабочей области (вдоль линии 1 ( $x=238$  мм,  $y=92,25$  мм,  $z=0 \div 420$  мм, начало координат в левом нижнем углу системы (рис.2)).

В данной системе применена *сборка на постоянных магнитах* совместно с использованием магнитомягких материалов (ярма, полюсных наконечников). Она включает в себя (рисунок 5):

- внешний магнитопровод (поз. 4);
- постоянные магниты (поз. 1) с направлением намагниченности вдоль/против оси X (направление осей - см. рисунок. 2) - 4 симметричных блока;
- постоянные магниты (поз. 2) с направлением намагниченности вдоль оси Y (направление осей - см. рисунок 2) – 2 симметричных блока;
- два симметричных полюсных наконечника (поз. 3).

Внешний магнитопровод (поз.4) предназначен для замыкания магнитных потоков постоянных магнитов (поз.1,2), выполнен из сплава с высокой индукцией насыщения. Толщина магнитопровода (который одновременно выполняет роль каркаса изделия) рассчитывается, исходя из магнитных параметров данного материала и механических нагрузок, приходящихся на него.

Необходимую однородность поля в центральной части конструкции (рисунок 5) обеспечивают нижний и верхний полюсные наконечники (поз. 3) в виде пластин сложной формы, которая была определена при помощи численных расчетов. Полюсный наконечник представляет собой элемент, выполненный из сплава с

высокой индукцией насыщения с особым профилем. Его отличительная черта – выступ в центральной части, форма которого позволяет достичь высокой однородности вертикальной составляющей индукции магнитного поля в рабочей области системы. В зависимости от размера рабочей области и требуемой однородности индукции магнитного поля выбирается форма выступа и его толщина. Края полюсного наконечника имеют специальную форму, позволяющую замкнуть в себе потоки магнитных элементов (поз.1). Постоянные магниты (поз.2) имеют направление намагниченности, позволяющее усилить и "выдавить" магнитный поток из полюсных наконечников (поз.3) в необходимую рабочую область системы. Полюсные наконечники (поз. 3) и внешний магнитопровод (поз. 4) замыкают в себе потоки от постоянных магнитов (поз. 1,2). В результате суперпозиции полей в магнитной сборке в рабочем зазоре создается необходимое и максимально однородное значение индукции магнитного поля.

Картина силовых линий данной магнитной системы представлена на рисунке 5.

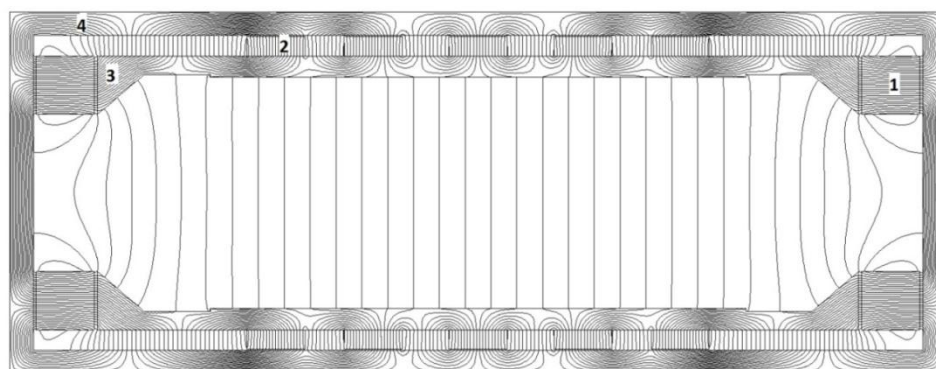


Рис. 5 Картина магнитных силовых линий в сечении, проходящем через центр магнитной системы.

На основании вышеприведенных расчетов было проведено конструирование и изготовление магнитной системы веерного анализатора нейтронного рефлектометра NeRo. Общий вид изготовленной магнитной системы показан на рисунке 6.

Показано, что магнитные сборки (рисунок 7 поз. 2) на торцах рассматриваемых систем позволяют снизить влияния краевых эффектов (рисунок 7 поз. 1 ( $L1 > L2$ )). Благодаря их применению удастся уменьшить длину магнитной системы и максимально приблизить её к позиционно-чувствительному детектору, что является

одним из важных критериев при проектировании современных нейтронных рефлектометров.

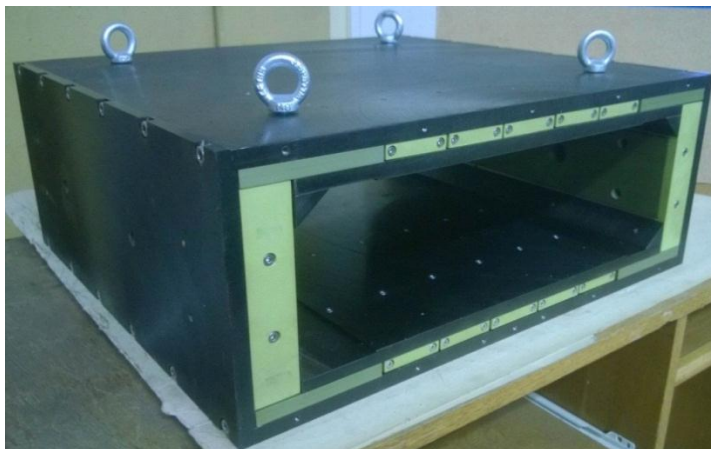


Рис. 6 Общий вид изготовленной магнитной системы анализатора нейтронного рефлектометра NeRo.

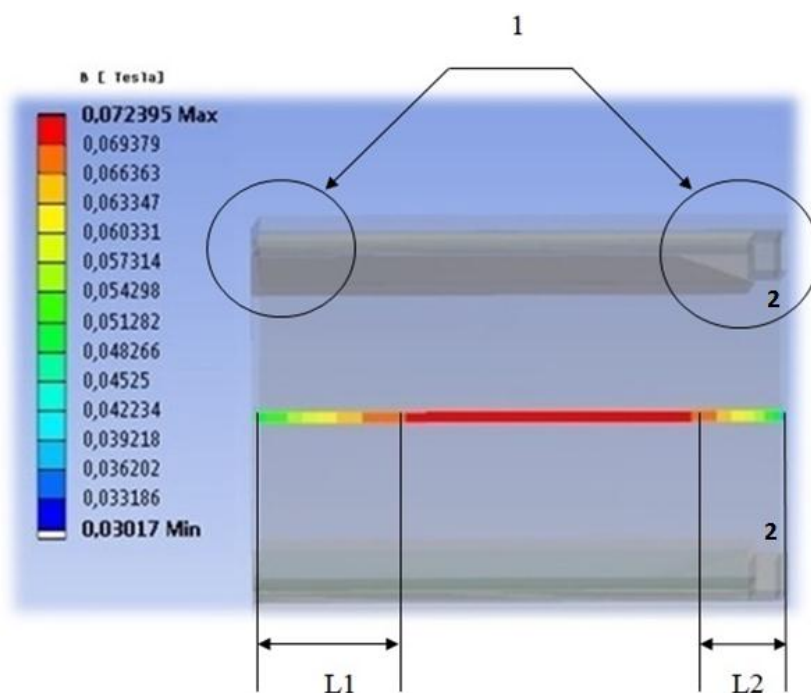


Рис.7 Влияние торцевой сборки на зону однородности.

На основании вышеприведенных расчетов было проведено конструирование и изготовление магнитной системы нейтронного анализатора рефлектометра РЕМУР (ОИЯИ, Дубна). Общий вид изготовленной магнитной системы показан на рисунке 8. Показано, что ход расчетных и экспериментальных зависимостей распределения индукции магнитного поля *совпадает*.



Рис. 8 Общий вид изготовленной магнитной системы нейтронного анализатора рефлектометра РЕМУР

**В третьей** главе представлен расчет электромагнита для рефлектометра поляризованных нейтронов.

К магнитной системе узла образца рефлектометра поляризованных нейтронов предъявлялись следующие требования:

- Размеры области, в которой нужно создать однородное магнитное поле, мм –  $80 * 50 * 50 (Z, Y, X)$ ;

- Ориентация магнитной индукции – вертикальная, т.е. есть вертикальная компонента магнитной индукции  $B_y$  должна быть максимально возможной, а компоненты  $B_x$  и  $B_z$  требуется минимизировать;

- Обеспечить в любой точке рабочей области выполнение условия  $B_y \geq 200 \text{ мТл}$ ;

- Отклонение значения вертикальной составляющей магнитной индукции не должно превышать 2%;

- Система должна иметь минимально возможные габариты и вес;

- Возможность обеспечения длительного режима работы электромагнита.

На рисунке 9 показан общий вид магнитной системы, с линиями 1 и 2, вдоль которых произведен расчет распределения индукции, результат которого представлен на рисунке 10.

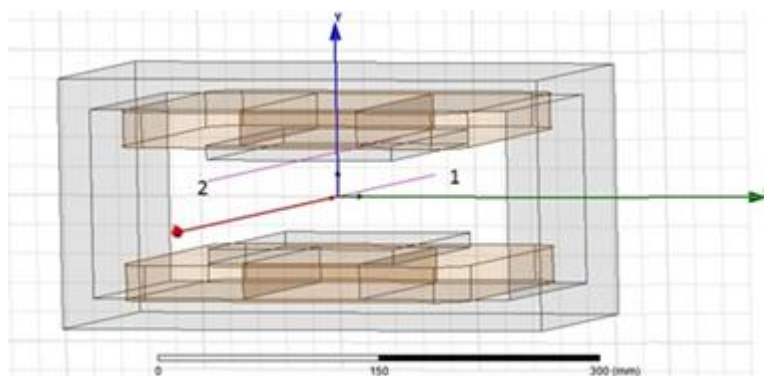


Рис.9 Общий вид рассчитанной магнитной системы.

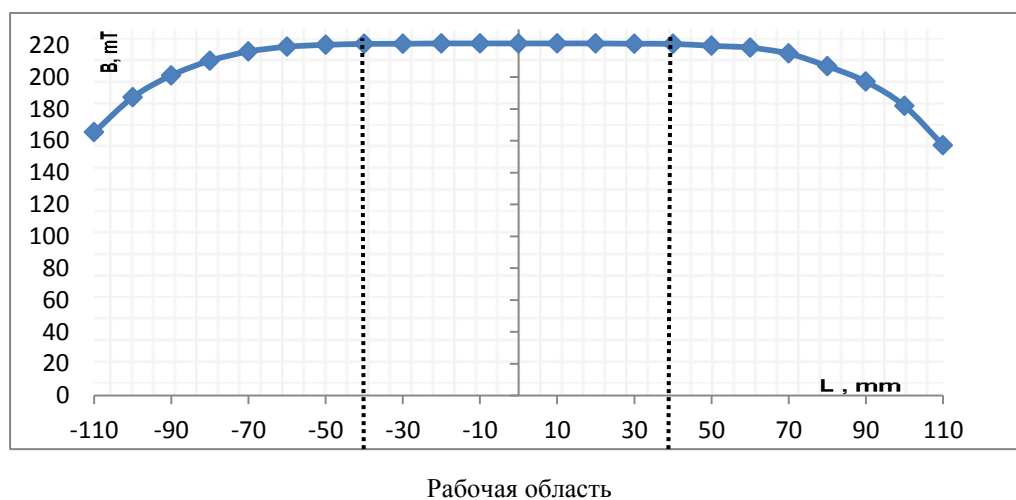


Рис.10 Распределение Y-составляющей индукции магнитного поля в рабочей области вдоль линии 1 на рис. 9 ( $x=0$  мм,  $y=0$  мм,  $z = -40$  до  $+40$  мм).

Картина силовых линий данной магнитной системы представлена на рисунке 11 (катушки не показаны). При разработке электромагнита для узла образца РПН были применены новые, не использовавшиеся ранее в аналогичных задачах решения, такие как:

- использование Т-образного профиля полюсных наконечников (см. рисунок 11, поз.1);
- расположение катушек намагничивания электромагнита симметрично в непосредственной близости от рабочей зоны;

Использование цельного профиля (поз.2 на рисунке 11) внешнего магнитопровода (ярма), который одновременно выполняет роль каркаса изделия, позволило замкнуть весь магнитный поток в системе, тем самым минимизировав паразитные утечки поля в окружающее пространство.



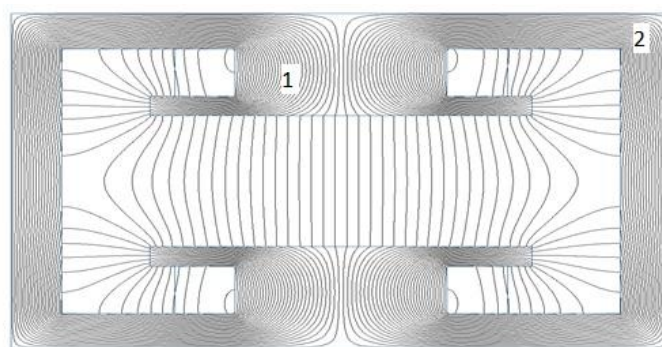


Рис. 11 Картина магнитных силовых линий в сечении, проходящем через центр магнитной системы.

Толщина профиля была определена при помощи расчетов, исходя из магнитных параметров данного материала и механических нагрузок, приходящихся на него.

На основании вышеприведенных расчетов был изготовлен электромагнит, внешний вид которого представлен на рисунке 12.

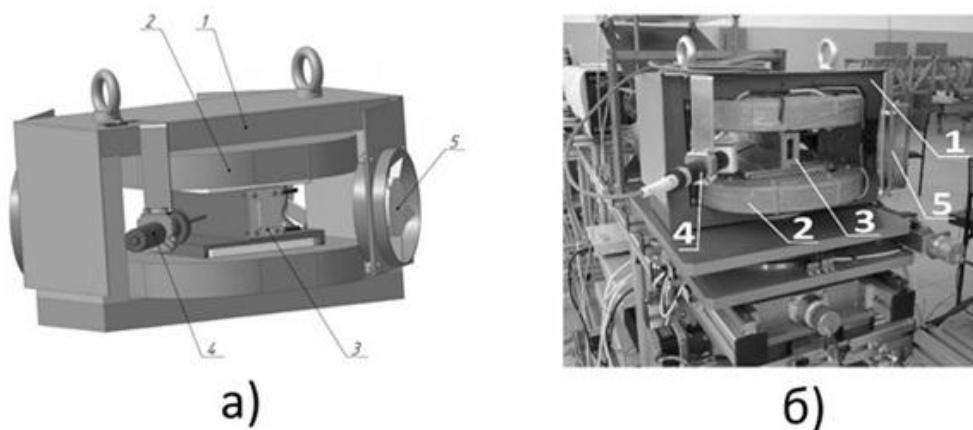


Рис. 12 Электромагнит узла образца РПН: а) 3D модель электромагнита; б) изготовленный электромагнит. 1 – магнитопровод (ярмо), 2 – катушка, 3 – держатель образца, 4 – измеритель магнитной индукции НВ0105.2А, 5 – вентилятор ВН-2.

Для обеспечения продолжительного режима работы электромагнита были применены следующие технические решения:

- расчет обмоточных данных из условия минимизации тепловых потерь в катушках намагничивания электромагнита;
- заливка катушек теплопроводящим компаундом для наилучшего отвода тепла от внутренних проводников;

– использование для обеспечения продолжительного режима работы электромагнита дополнительных вентиляторов для принудительного воздушного охлаждения (см. рисунок 12 а, поз.5).

В результате требования к электромагниту были успешно реализованы, что подтверждается результатами измерений. Показано, что ход расчетных и экспериментальных зависимостей распределения индукции магнитного поля *совпадает*. Работоспособность предложенного подхода была экспериментально подтверждена в ходе эксплуатации данного электромагнита.

### **Основные результаты, полученные в диссертационной работе:**

1. Проведен анализ магнитотвердых и магнитомягких материалов, сформулированы основные требования к ним для применения в магнитных системах рефлектометров поляризованных нейтронов. Показано, что оптимальным магнитомягким материалом при разработке данного класса магнитных систем является технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь) или АРМКО-железо, а оптимальным магнитотвердым материалом при разработке данного класса магнитных систем является неодим-железо-бор (NdFeB);

2. Предложен новый метод формирования магнитного поля в системах рефлектометров поляризованных нейтронов на основе применения магнитных сборок – комбинаций магнитомягких и магнитотвердых материалов.

3. Показано, что использование сочетания магнитотвердых и магнитомягких материалов в магнитных сборках позволяет создавать магнитные системы с высокими значениями индукции магнитного поля и её однородности в минимальных массогабаритах;

4. Проведена классификация магнитныхборок, выбран необходимый класс сборки и выделены его основные преимущества;

5. Показана практическая реализация метода формирования магнитного поля в системах для современных нейтронных рефлектометров на основе применения магнитныхборок. Рассчитаны и изготовлены:

- Магнитная система веерного анализатора нейтронного рефлектометра NeRo;
- Магнитная система формирователя для нейтронного рефлектометра NeRo;

- Магнитная система нейтронного многоканального веерного широкоапертурного анализатора для рефлектометра «Magnetism Reflectometer»;
- Магнитная система нейтронного анализатора рефлектометра РЕМУР;
- Магнитная система формирователя пучка нейтронного пучка для рефлектометра РПН.

6. Рассчитана магнитная система для расходомера многофазных текучих сред;

7. Показано, что для рассчитанных магнитных систем на постоянных магнитах и электромагнитах экспериментальные и расчетные данные по величине индукции магнитного поля и его однородности совпадают с хорошей точностью, что определяет данный подход как работоспособный, позволяющий создавать необходимые магнитные системы с заданными характеристиками;

8. Показано, что магнитные сборки на торцах рассматриваемых систем позволяют снизить влияния краевых эффектов, что приводит к уменьшению длины магнитной системы и дает возможность максимально приблизить её к позиционно-чувствительному детектору;

9. Показано, что применение новых, не использовавшихся ранее в аналогичных задачах решений позволяет создавать электромагниты с повышенными требованиями к величине и однородности магнитного поля. На основе проведенных расчетов разработан и создан электромагнит для узла рефлектометра поляризованных нейтронов реактора ИР-8.

#### **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

##### **Публикации, входящие в список ВАК:**

1. **Gilev A.G.**, Pleshanov N.K., Bazarov B.A., Bulkin A.P., Schebetov A.F., Syromyatnikov V.G., Tarnavich V.V., Ulyanov V.A. Magnetic systems for wide-aperture neutron polarizers and analyzers // **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**. –2016. –V. 833. – P. 233 – 238.

2. **Гилев А.Г.**, Ульянов В.А., Калинин С.И., Дьячков М.В., Шмелев Г.Е. Электромагнит узла образца рефлектометра поляризованных нейтронов реактора ИР-8 НИЦ «Курчатовский институт». **Научное приборостроение**, 2019. – Т.29. – В.2. – С. 54-63.

3. Марусина М.Я., Базаров Б.А., Галайдин П.А., Силаев А.А., Марусин М.П., Закемовская Е.Ю., **Гилев А.Г.**, Алексеев А.В. Магнитная система на основе

постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред. **Измерительная техника**, 2014. – Т.4. – С. 62-65.

#### **Публикации в других изданиях и материалах конференций:**

4. **Gilev A.G.**, Bazarov B.A., Ulyanov V.A., Syromyatnikov V.G., Lauter V., Kuznetsov I.N., Medvedev E.N. Development and creation of magnetic system for fan analyzer of polarization of neutrons // Gatchina: Preprint PNPI. – 2012. – N. 2916. – P. 11.

5. **Gilev A.G.**, Pleshanov N.K., Bazarov B.A., Bulkin A.P, Shebetov A.F., Syromyatnikov V.G., Ulyanov V.A., Lauter V. Magnetic systems for neutron optical polarizers and analyzers with large cross section // Gatchina: Preprint PNPI. – 2013.–N. 2931. – P.17.

#### **Список цитируемой литературы**

1. Чаплыгин Ю.А. Нанотехнологии в электронике. – М.: Техносфера, 2005. –446 с.
2. Никитенко Ю.В., Сыромятников В.Г. Рефлектометрия поляризованных нейтронов. – М.: Физматлит, 2013. – 224 с.
3. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей. – М.: Наука, 1964. – С. 199-244.
4. Balasoiu M., Kirilov A.S., Kutuzov S.A., Smirnov A.A., Kappel W., Cios M., Cios A., Kuklin A.I. Magnetic system for small-angle neutron scattering investigation at YUMO instrument of nanomaterial // Joint Institute for Nuclear Research. – 2008. – P.3.
5. Осинская Ю.В., Петров С.С., Покоев А.В., Рунов В.В. Исследование методом малоуглового рассеяния нейтронов магнитопластического эффекта в бериллиевой бронзе при старении в магнитных полях. Физика твердого тела. – 2010. –Т. 52. – В. 3. – 487 с.

Гилев Александр Георгиевич  
**МОДЕРНИЗАЦИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ  
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_. \_\_. \_\_\_\_\_. Формат бумаги 60x84 1/16

Авт.л.1. Тираж 100 экз.

НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ.  
188300, Россия Лен. область, г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1.