

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
по научной работе

НИИ «Курчатовский институт»

О.Ф. Лобанович



_____ 20__ г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Булавина Максима Викторовича

«Шариковый холодный замедлитель реактора ИБР-2: некоторые аспекты создания и применения»,

представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

В последние десятилетия при проведении фундаментальных исследований в области физики твердого тела, химии, биологии, геологии, а также в целом ряде технических приложений, все более и более значительное место занимают методы нейтронной физики, основанные на рассеянии холодных нейтронов с длиной волны $\lambda \geq 4 \text{ \AA}$. Связано это в первую очередь с тем, что в диапазоне холодных нейтронов в большей степени, чем для тепловых нейтронов, проявляются их волновые свойства.

Применение холодных нейтронов в установках малоуглового рассеяния и в нейтронных рефлектометрах открывает широкие перспективы исследований морфологии и внутреннего строения наноструктурированных объектов, нанокомпозитов и длиннопериодических атомных и магнитных структур.

Поскольку в спектре нейтронов, который формируется стандартным для импульсного быстрого реактора (ИБР-2) тепловым замедлителем (вода при температуре близкой к комнатной), доля холодных нейтронов очень мала, сама возможность проведения и развития подобных исследований в экспериментах на этом уникальном источнике нейтронов, в значительной мере определяется наличием и параметрами криогенного замедлителя нейтронов.

Именно поэтому, представленная диссертантом работа, которая является итогом научных исследований и инженерно-технических разработок, направленных на создание криогенного замедлителя нейтронов для импульсного реактора ИБР-2, безусловно, является не просто актуальной, а очень актуальной.

Наиболее существенные научные результаты, полученные соискателем и определяющие научную новизну.

В **первой главе** проводится анализ литературных данных по применению различных материалов в качестве холодных замедлителей нейтронов. Дается обоснование использования мезитилена в качестве материала, замедляющего нейтроны. Приводится описание созданного холодного замедлителя нейтронов, который представляет собой сложную и уникальную физическую установку, в конструкции которой используется оригинальная идея: замедляющей средой являются шарики замороженной смеси углеводородов мезитилена и метаксилола. Камера замедлителя, расположенная вблизи активной зоны реактора, заполняется шариками (около 30000 штук) с помощью также абсолютно оригинального

устройства, основанного на идее криогенного пневмотранспорта холодным гелием.

Во **второй главе** представлены результаты теоретического и экспериментального исследования пневмотранспорта шариков.

В частности, выведены уравнения движения идеального шарика в гладкой прямой трубе. На основании полученных уравнений впервые проведено численное моделирование движения шарика в прямой трубе для различных скоростей потока газа.

По результатам теоретических расчетов и лабораторных экспериментов определены параметры пневмотранспорта шариков в прямой круглой трубе.

Для выяснения особенностей движения шарика по криогенному трубопроводу сложной конфигурации с поворотами и наличием участков с подъемами и спусками, был впервые разработан и создан полномасштабный испытательный стенд, в котором в масштабе 1:1 повторялись все основные узлы и системы реального холодного замедлителя и пневмотранспортной системы. По результатам экспериментов, проведенных на этом стенде, впервые установлены значения параметров оптимального режима загрузки шариков в камеру холодного замедлителя.

Важно отметить, что большая часть из описанных выше результатов получена впервые, а все эксперименты выполнены по оригинальным, методикам на специально разработанных и построенных стендах. Полученные данные были использованы при конструировании, создании и наладке, как отдельных технологических узлов, так и всей холодной пневмотранспортной системы для шариков замороженного мезитилена.

Третья глава посвящена итогам опытной эксплуатации холодного шарикового замедлителя, расположенного в направлении пучков №№ 7, 8, 10 и 11 реактора ИБР-2, в ходе, которой определены его важнейшие

эксплуатационные параметры и нейтронно-физические характеристики. Опыты проводились в течение 15-ти циклов, длительность которых варьировалась от нескольких часов до 10.6 суток. В этих экспериментах подтверждена высокая надежность пневмотранспортной и охлаждающей системы, которая обеспечивала загрузку камеры замедлителя шариками замороженного мезитилена за 4 часа, без их разрушения, и дальнейшую работу замедлителя при $T=32$ К.

Показано, что применение холодного шарикового замедлителя дает для рефлектометра РЕМУР (пучок № 8) восьмикратное, по сравнению со случаем теплового замедлителя, увеличение интенсивности поляризованных нейтронов в диапазоне длин волн $6 - 8$ Å. Важно отметить, что сам диапазон доступных в эксперименте длин волн нейтронов расширяется до 16 Å.

На основе сравнения, спектров нейтронов, некогерентно рассеянных образцом ванадия, экспериментально измеренных на дифрактометре СКАТ (пучок № 7б), установлено, что имеет место четырехкратный выигрыш в интенсивности нейтронов с длиной волны 4 Å при использовании холодного замедлителя, по сравнению со случаем использования теплового замедлителя. С ростом длины волны фактор выигрыша заметно возрастает.

В четвертой главе дается анализ эффективности применения холодного шарикового замедлителя нейтронов в экспериментах на выведенных пучках. В частности, на рефлектометре РЕМУР выполнены исследования угловой и энергетической (в диапазоне $2 - 6$ Å) зависимостей интенсивности микропучка нейтронов, получаемого в плоском трехслойном тонкопленочном волноводе. Установлено, что весь цикл этих исследований занял в десять раз меньше времени, чем требуется при использовании теплового замедлителя. В диапазоне длин волн до 7.7 Å исследовано пространственное расщепление пучка поляризованных

нейтронов при отражении от магнитно-неколлинеарной пленки. Экспериментально показано, что угол между пучком без переворота спина нейтрона (++) и пучком с переворотом спина (+-), т.е. пространственное расщепление, заметно возрастает с увеличением длины волны нейтронов.

На дифрактометре СКАТ исследован фазовый состав и проведен текстурный анализ образца мелкодисперсного консолидированного сланца. В экспериментах с холодным шариковым замедлителем впервые удалось уверенно обнаружить в составе образца слабо рассеивающие минералы, для которых характерно наличие дифракционных максимумов в длинноволновом диапазоне.

Следует подчеркнуть, что успешное проведение всех вышеописанных экспериментов с длинноволновыми нейтронами стало возможным только благодаря использованию холодного замедлителя нейтронов, снабженного системой криогенного пневмотранспорта замороженных шариков мезитилена.

В ходе выполнения исследований получен ряд новых и важных результатов, характеризующих **новизну** и **научную значимость** диссертационной работы. Ниже представлены лишь некоторые из них:

- Впервые экспериментально установлено, что движение шарика в трубе под действием потока газа имеет прерывистый характер и происходит в виде прыжков после отскоков от стенки трубы или при столкновении с шероховатостями трубы.
- Получены значения параметров оптимального режима работы криогенной пневмотранспортной системы загрузки шариков мезитилена в камеру холодного замедлителя: температура (80-85 К) и скорость потока гелия в трубе (11 – 14 м/с); средняя скорость шариков во время загрузки (2,5 - 3 м/с); темп подачи шариков из дозатора (до 8 шт/с).

- Решена задача создания криогенной пневмотранспортной системы, обеспечивающей загрузку камеры замедлителя замороженными шариками мезитилена.
- Впервые установлено, что время непрерывной работы замедлителя от одной загрузки камеры холодными шариками на номинальной мощности реактора 2 МВт и при температуре замедлителя 32-33 К, составляет 10 суток, и лимитируется процессом радиационной полимеризации мезитилена, в результате которой существенно возрастают плотность и вязкость субстанции, находящейся в камере замедлителя.
- Существенно уточнен количественный минеральный состав исследованного образца мелкодисперсного консолидированного сланца, по сравнению с данными, полученными ранее на тепловом замедлителе.

Практическая значимость представленной диссертации заключается в том, что результаты работы и разработанные автором методики будут востребованы в российских (НИЦ «Курчатовский институт», ПИЯФ, ИЯИ РАН, ИФМ УрО РАН) и зарубежных нейтронных центрах при проектировании и создании холодных замедлителей и источников холодных нейтронов.

Достоверность результатов работы и **обоснованность** выводов автора не вызывают сомнений и подтверждаются публикациями автора в реферируемых международных изданиях и успешным функционированием разработанной пневмотранспортной системы.

Оформление диссертации, публикации и апробация.

Диссертация в целом представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, а ее оформление соответствует требованиям ВАК РФ. Материал в целом хорошо структурирован и иллюстрирован. Результаты и выводы прошли надежную апробацию: на всероссийских и

международных конференциях было представлено 13 докладов. Материалы диссертации изложены в 23 научных публикациях, в том числе в 10 статьях в журналах из списка ВАК РФ и в Патенте РФ.

Вместе с тем, диссертация не лишена некоторых недостатков, в частности:

1. Комментарий к рисункам 49а и 49б в тексте диссертации не вполне согласуется с тем, что изображено на рисунке 49а. В частности, из рисунка следует, что интенсивность нейтронов с длиной волны 10 \AA , генерируемых тепловым замедлителем, точно такая же как интенсивность нейтронов с длиной волны 14 \AA , генерируемых холодным замедлителем. В тоже время, в тексте на стр. 97 говорится: «Далее 8 \AA сравнение (спектров) невозможно из-за практически полного отсутствия длинноволновых нейтронов в спектре теплового замедлителя». Не очень ясно, почему в случае холодного замедлителя количество нейтронов с длиной волны 14 \AA вполне измеримо, а в случае теплового замедлителя такое же (см. рис. 49а) количество нейтронов с длиной волны 10 \AA соответствует почти полному их отсутствию. Представляется не вполне удачным и выбор «относительных единиц», в которых измеряется интенсивность на рис. 49а, если уж это относительные единицы, то было бы понятней, если бы они изменялись от 1 до 10^6 . Все сказанное относится и к соответствующему рисунку 12а в автореферате диссертации.

2. В комментарии к рисунку 50б сравнение спектров, полученных на тепловом и холодном замедлителях, проводится в терминах межплоскостных расстояний, что довольно бессмысленно в случае практически полностью некогерентного рассеяния нейтронов на ванадии. Тем более, что на самом рисунке спектры представлены как функции длины волны.

3. В целом диссертация написана внятным и вполне профессиональным языком, но встречаются жаргонные выражения, стилевые и

орфографические погрешности. Например, на 37 странице написано: «Данные о движении одиночного шарика.... также отсутствовало», или на 127 странице: «спектры в длинноволновой области (начиная с $d=2,5 \text{ \AA}$), полученные с холодного замедлителя имеют гораздо лучшее разрешение». Следует более ответственно подходить к написанию и выверке текста.

Заключение

Указанные замечания не влияют на положительную оценку диссертации.

Диссертация Булавина М.В. является научно-квалификационной работой выполненной на хорошем профессиональном уровне, она содержит **впервые** полученные, **новые** результаты, которые послужили основой для создания и опытной эксплуатации на импульсном реакторе ИБР-2 сложной физической установки – холодного замедлителя нейтронов. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, теоретически и экспериментально обоснованы и достоверны. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации.


Диссертационная работа Булавина М.В. в целом по своему содержанию, объему выполненных исследований, новизне, практической и научной значимости полностью удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Булавин Максим Викторович, несомненно заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсуждён и одобрен на заседании Отдела нейтронных экспериментальных станций Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований НИЦ «Курчатовский институт»

19 июня 2017 г. Присутствовало: 17 человек из них 7 кандидатов наук и 4 доктора наук.

Отзыв составил

Ведущий научный сотрудник
Отдела нейтронных экспериментальных
станций Курчатовского комплекса
синхротронно-нейтронных исследований
доктор физико-математических наук

 П.П. Паршин

Начальник
Отдела нейтронных экспериментальных
станций Курчатовского комплекса
синхротронно-нейтронных исследований
доктор физико-математических наук

 В.Т. Эм

Руководитель Комплекса, ККСНИ
доктор физико - математических наук

 А.Е. Благов

Главный ученый секретарь Центра



С.Ю. Стремоухов

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.
Телефон: +7 (499) 1969539 Факс: +7 (499) 1961704
E-mail: nrcki@nrcki.ru