

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 720.001.06

на базе Объединённого института ядерных исследований

(международная межправительственная организация)

по диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 6 октября 2017 г. №242

о присуждении **Булави́ну Макси́му Макси́мовичу**, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидат физико-математических наук.

Диссертация «Шариковый холодный замедлитель реактора ИБР-2: некоторые аспекты создания и применения» в виде рукописи по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 28 апреля 2017, протокол №241 диссертационным советом Д720.001.06 на базе международной межправительственной организации Объединённый институт ядерных исследований, 141980, г. Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, д. 6.

Соискатель Булавин Максим Викторович 1985 года рождения в 2007 году окончил Тульский государственный университет, 300600, г. Тула, пр. Ленина, д. 92.

Соискатель работает начальником группы в международной межправительственной организации Объединённый институт ядерных исследований в Лаборатории нейтронной физики им И.М. Франка, 141980 г. Дубна Московской обл. ул. Жолио-Кюри, д. 6 с 2006-го года по настоящее время.

Диссертация выполнена в Лаборатории нейтронной физики им И.М. Франка, Объединённого института ядерных исследований, 141980 г. Дубна Московской обл. ул. Жолио Кюри, д. 6.

Научный руководитель Шабалин Евгений Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им И.М. Франка, Объединённого института ядерных исследований, 141980 г. Дубна Московской обл. ул. Жолио Кюри, д. 6.

Официальные оппоненты: Григорьев Сергей Валентинович, доктор физико-математических наук, заместитель директора по международной деятельности ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики» НИЦ «Курчатовский институт» и Сидоркин Станислав Федорович, кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего сектором импульсных источников нейтронов Лаборатории нейтронных исследований ФГБУН Институт ядерных исследований РАН дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» в своём положительном заключении (отзыв подготовил Паршин П.П., доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отдела нейтронных экспериментальных станций Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований (ККСНИ)), подписанном руководителем комплекса ККСНИ, доктором физико-математических наук, А.Е. Благовым и утвержденным заместителем директора по научной работе НИЦ «Курчатовский институт» Э.Ф. Лобановичем отметила, что диссертация М.В. Булавина является итогом научных исследований и инженерно-технических разработок, направленных на создание криогенного замедлителя нейтронов для импульсного реактора ИБР-2. Ценность 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. 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. При-

менение холодных нейтронов в установках малоуглового рассеяния и в нейтронных рефлектометрах открывает широкие перспективы исследований морфологии и внутреннего строения наноструктурированных объектов, нанокompозитов 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.

Криогенный замедлитель нейтронов ИБР-2 представляет собой сложную физическую установку, в конструкции которой используется оригинальная идея: замедляющей средой являются шарики замороженной смеси углеводов мезитилена и метаксилола. Камера замедлителя, расположенная вблизи активной зоны реактора, заполняется шариками (около 30000 штук) с помощью криогенного пневмотранспорта холодным гелием.

Для выяснения особенностей движения шарика по криогенному трубопроводу сложной конфигурации был впервые разработан и создан полномасштабный испытательный стенд, в котором повторялись все основные узлы и системы реального холодного замедлителя и пневмотранспортной системы. По результатам экспериментов 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.

В ходе опытной эксплуатации холодного шарикового замедлителя определены его важнейшие эксплуатационные параметры и нейтронно-физические характеристики. 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.

Кроме того, в работе продемонстрирована высокая эффективность 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.

Соискатель имеет 23 опубликованные работы по теме диссертации, из кото-

рых 10 работ в научных изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе цитируемых базами данных Web of Science и Scopus, РИНЦ (9 статей в журналах и 1 патент на изобретение).

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Испытательный стенд шарикового криогенного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2 / М.В. Булавин, В.Д. Ананьев, А.А. Беляков, А.А. Богдзель, А.Е. Верхоглядов, Е.Н. Кулагин, С.А. Куликов, А.А. Кустов, А.А. Любимцев, К.А. Мухин, Т.Б. Петухова, А.П. Сиротин, А.Н. Федоров, Д.Е. Шабалин, Е.П. Шабалин и В.К. Широков // Журнал приборы и техника эксперимента. – 2013. – №1. – С. 128-134.
2. The world's first pelletized cold neutron moderator at a neutron scattering facility / M.V. Bulavin, S.A. Kulikov, V.D. Ananiev, A.A. Belyakov, A.E. Verkhoglyadov, E.N. Kulagin, A.A. Kustov, K.A. Mukhin, E.P. Shabalin, D.E. Shabalin, T.B. Petukhova, A.P. Sirotin and V.K. Shirokov // Nuclear instruments and methods in physics – 2014. – Vol. 320. – P. 70-74.
3. Control system of pelletized cold neutron moderator of the IBR-2 reactor / M.V. Bulavin, A.A. Belyakov, A.N. Chernikov, A. Churakov, S. A. Kulikov, E. Litvinenko, A. Petrenko, A. E. Verkhoglyadov, E. N. Kulagin, K. A. Mukhin, E. P. Shabalin, T.B. Petukhova, A.P. Sirotin and V.K. Shirokov // Physics of particles and nuclei letters. – 2015. – Vol. 12, №6. – P. 773-777.
4. Пат. 2492538 Российская Федерация, МПК G 21 К 001/00. Шариковый холодный замедлитель нейтронов [Текст] / М.В. Булавин, В.Д. Ананьев, А.А. Беляков, А.Е. Верхоглядов, С.А. Куликов, А.А. Кустов, К.А. Мухин, Д.Е. Шабалин, Е.П. Шабалин; заявитель и патентообладатель Объединенный институт ядерных исследований. – Оpubл. RU БИПМ № 35, 10.09.2013. – С. 2.
5. Использование криогенного замедлителя на нейтронном рефлектометре РЕМУР / М.В. Булавин, С.В. Кожевников, В.Д. Жакетов, А.В. Петренко, А.Е. Верхогля-

дов, С.А. Куликов, Е.П. Шабалин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – №1, с. 5-14.

6. Использование комбинированного замедлителя на реакторе ИБР-2: преимущества для нейтронографического текстурного анализа горных пород / М.В. Булавин, Р.Н. Васин, С.А. Куликов, Т. Локаичек, Д.М. Левин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 5, с. 1-10.
7. To theory of pneumotransport of beads of cold neutron moderator of the IBR-2 reactor / M.V. Bulavin, A.V. Kazakov and E.P. Shabalin // Physics of particles and nuclei letters. – 2017. – Vol. 14, №3. – 520–532.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается известностью их работ в научных кругах, применением в исследованиях наиболее передовых современных методов и технологий.

Диссертационный совет отмечает, что многие исследования были выполнены соискателем впервые:

- Впервые экспериментально изучено движение одиночных твердых шариков в трубе в потоке газа, в том числе замороженных шариков из смеси ароматических углеводородов при пневмотранспорте газообразным гелием с температурой 80-85 К по криогенному трубопроводу сложной конфигурации, включающем загрузочное устройство и камеру холодного замедлителя
- Продемонстрирована возможность создания холодного замедлителя нейтронов на импульсном исследовательском реакторе ИБР-2 на основе твердых шариков мезитилена, обеспечивающего длительный режим (до 10 суток) стабильной работы
- Шариковый холодный замедлитель впервые предоставил возможность получать микропучки холодных нейтронов и использовать метод пространственного расщепления пучка с высокой интенсивностью, а также проводить экспериментальные исследования на рефлектометре РЕМУР в 10 раз быстрее, чем с использованием замедлителя на основе воды комнатной температуры

- Показано, что использование шарикового холодного замедлителя позволяет в 3-4 раза сократить время эксперимента на дифрактометре СКАТ при сохранении точности получаемых результатов.

Результаты работы будут использованы при создании следующих двух холодных замедлителей ИЯУ ИБР-2 и замедлителя для источника SINQ, PSI (Швейцария), а также в других научных центрах.

Основные приближения и модели были проверены путем сравнения промежуточных результатов с независимыми источниками, принятыми в сообществе, а также с экспериментальными данными. Результаты работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах, входящих в список ВАК, докладывались на национальных и международных конференциях и хорошо известны специалистам в данной отрасли.

Личный вклад соискателя состоит в разработке и изготовлении экспериментальных установок, введении их в эксплуатацию, проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и обсуждении полученных данных, формулировке научных выводов, а также в подготовке статей к публикации. На основании исследований на лабораторном стенде при непосредственном участии автора были проведены эксперименты на полномасштабном испытательном стенде шарикового холодного замедлителя по загрузке замороженных шариков из смеси мезитилена и м-ксилола в камеру-имитатор и определены оптимальные параметры работы замедлителя при пневмотранспорте шариков в камеру-имитатор. При непосредственном руководстве автора во время тестовой эксплуатации холодного замедлителя было проведено несколько загрузок камеры во время работы реактора ИБР-2 на мощности 2 МВт, в результате чего получены оптимальные эксплуатационные параметры работы холодного замедлителя. В рамках тестовой эксплуатации холодного замедлителя на пучках СКАТ (№8) и РЕМУР (№7А1), на стандартных образцах, автором были получены нейтронные спектры, показывающие выигрыш в плотности потока нейтронов в более широком диапазоне длин волн по

сравнению с водяным замедлителем. Автор принимал непосредственное участие в экспериментах по получению микропучка и пространственному расщеплению пучка холодных нейтронов, а также проводил дифракционный анализ структуры и текстуры образца горной породы.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критериям внутреннего единства, что подтверждается анализом результатов и сравнением их с экспериментальными данными. Поставленные в работе цели достигнуты, задачи решены на высоком научном уровне.

Диссертационный совет сделал вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, соответствующую критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, и принял решение присудить Булавину М.В. учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 6 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени 18, против присуждения ученой степени - нет, недействительных бюллетеней нет.

Председатель диссертационного совета,  
академик РАН

Ю.Ц. Оганесян

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.Г. Полеко