

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**на диссертацию Булавина Максима Викторовича**  
**«Шариковый холодный замедлитель реактора ИБР-2: некоторые аспекты**  
**создания и применения», представленную на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы**  
**и методы экспериментальной физики**

В последнее время область исследований в физике конденсированного состояния методами рассеяния нейтронов все больше смещается в сторону исследования длиннопериодных систем, т.е. систем с межатомным расстоянием более 4 Å. Для реализации таких исследований необходимо создавать источники нейтронов с соответствующей длиной волны или, другими словами, источники холодных нейтронов или холодные замедлители. На реакторе ИБР-2 до настоящего времени не было стабильно работающего холодного замедлителя, который генерировал бы высокоинтенсивные пучки холодных нейтронов для физических исследований. Наличие такого замедлителя и его комбинирование со стандартным замедлителем на основе воды комнатной температуры позволило бы получать высокоинтенсивные пучки нейтронов для физических исследований на спектрометрах реактора ИБР-2 в очень широком диапазоне длин волн. Реализация такого проекта выведет реактор ИБР-2 на лидирующие позиции в мире по проведению исследований с использованием холодных нейтронов.

В настоящее время в России нет ни одного действующего источника холодных нейтронов, кроме введенного в работу в 2012 году на реакторе ИБР-2 холодного замедлителя на основе твердой замороженной смеси ароматических углеводородов, созданного с участием диссертанта и являющегося одним из объектов его диссертации, в то время как в мире работают более 15, из них 4 в США, 3 - во Франции, 3 – в Англии, 2 – в Японии, 1- в Австралии, 2- в Германии, 1 - в Венгрии, 1 – в Швейцарии. С завершением создания на ИЯУ ИБР-2 комплекса биспектральных замедлителей, в которых будет три холодных замедлителя, вкпе с пуском стационарного реактора ПИК в Гатчине и модернизацией реактора ИР-8 в Москве (НИЦ «Курчатовский институт») Россия получит современный парк спектрометров для изучения свойств современных материалов с высокой производительностью и точностью. Все сказанное отражает **актуальность темы** диссертационной работы Булавина М.В.



Важной особенностью диссертации является то, что в ней рассматривается новый принцип работы холодного замедлителя: замороженные шарики из смеси ароматических углеводородов загружаются в камеру у активной зоны реактора по трубопроводу сложной конфигурации газообразным гелием при криогенных температурах. Сформулированные задачи состояли в разработке метода проверки работоспособности выбранного принципа загрузки шариков в камеру замедлителя, определении оптимального режима его работы на основе расчетов, эксперимента и тестовой эксплуатации на максимальной мощности реактора ИБР-2, и наконец, демонстрации тех улучшений, которые дает замедлитель при работе его на физический эксперимент на спектрометрах реактора.

**Во введении** сформулирована цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту, обсуждаются актуальность, новизна и практическая значимость проводимых исследований.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы по материалам холодных замедлителей нейтронов и способам их загрузки в камеру замедлителя. Анализируя недостатки и преимущества основных материалов, используемых в качестве холодных замедлителей, автор ставит на особое место смесь ароматических углеводородов мезитилена и м-ксилола. Обсуждая способы загрузки смеси в камеру замедлителя, автор делает вывод о том, что наилучшим решением здесь будет использование пневмотранспорта замороженных шариков из данной смеси.

**Во второй главе** приведены результаты теоретического и экспериментального исследования пневмотранспорта шариков в круглой прямой трубе с гладкими и негладкими стенками и в криогенном трубопроводе сложной конфигурации с участками поворотов и подъемами. Показано, что движение шара в трубопроводе под действием газа происходит в виде прыжков и отскоков, после столкновения со стенками трубы, является нерегулярным и хаотическим с большим разбросом скорости и времени движения. Результаты теоретических расчётов и экспериментов на лабораторных и специальном испытательном стендах позволили доказать работоспособность выбранного принципа загрузки и определить оптимальный режим работы холодного замедлителя во время загрузки камеры и при работе на физический эксперимент. В результате чего шариковый



холодный замедлитель был создан и введен в тестовую эксплуатацию на реакторе ИБР-2.

**Третья глава** посвящена результатам тестовой эксплуатации и нейтронно-физическим данным холодного замедлителя К3202. Всего за время опытной эксплуатации осуществлено 11 циклов работы (загрузок камеры) замедлителя на номинальной мощности реактора 2 МВт. Длительность циклов составляла от нескольких часов до 10,4 суток (510 МВт·ч). Общее время стабильной и безотказной работы на физический эксперимент на мощности реактора – 2500 часов, что является очень хорошим показателем для нового разработанного замедлителя. Предварительные измерения на стандартных образцах на спектрометрах ИБР-2 показали, что выход холодных нейтронов с поверхности холодного замедлителя выше, по сравнению со стандартным тепловым замедлителем на основе воды.

**В четвертой главе** приведено обоснование выбора типа экспериментов и объектов исследования и представлены результаты экспериментов получения микропучка, пространственного расщепления пучка холодных нейтронов и текстурного анализа образца сланца с использованием холодного замедлителя. Основным и наиболее интересным результатом работы является то, что использование разработанного холодного замедлителя, на основе шариков из смеси ароматических углеводородов позволяет на порядок сократить время эксперимента и расширить диапазон изучаемых длин волн. Для спектрометра РЕМУР выигрыш в интенсивности по сравнению с тепловым замедлителем доходит до 10 раз, а доступный диапазон длин волн увеличивается в 2 раза и доходит до 16 Å. Для спектрометра СКАТ выигрыш в интенсивности по сравнению с тепловым замедлителем доходит до 4 раз, при этом погрешность измерений снижается в 2 раза.

Представленная работа в целом является законченным исследованием и завершает определенный этап развития интенсивных источников нейтронов для исследований свойств веществ, материалов, например, биологических структур и т.п. Можно уверенно заявить, что отныне наиболее эффективным источником холодных нейтронов на ядерных установках средней интенсивности (до 1-2 МВт) следует считать дисперсные углеводороды. Конечно, можно сожалеть о том, что



автор с коллегами к данному моменту не освоили методику непрерывной смены твердых гранул в камере замедлителя. В случае успешного завершения этого следующего этапа твердодисперсные замедлители получили бы более широкое применение, в том числе и на мощных источниках на основе реакций испарения. Вместе с тем полученные результаты несомненно будут использованы при создании следующих двух холодных замедлителей ИЯУ ИБР-2.

Работа написана хорошим русским языком и прекрасно структурирована. В тексте диссертации практически невозможно найти орфографических и стилистических ошибок и опечаток. В то же время она не лишена и некоторых огрехов. К техническим недостаткам оформления следует отнести ссылки на переводные версии журналов, издаваемых на русском языке, таких как «Письма в ЖЭТФ» (ссылка [89]), «ЖЭТФ» (ссылка [88]), «Поверхность: Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования» (ссылка [87]).

Отмеченные огрехи даже нельзя назвать недостатками и они ни в коей мере не уменьшают достоверности и важности полученных результатов и выводов работы.

В качестве рекомендации можно пожелать автору подумать об актуальности и применении исследования, проведенного в рамках Главы 2 «Исследование пневмотранспорта шариков холодного замедлителя нейтронов», в химической промышленности. Нельзя исключить, что такое исследование будет востребовано и в задачах движения автотранспорта и велотранспорта по современным строящимся российским дорогам, то есть такое исследование имеет и социальную направленность.

В заключение, следует отметить, что соискателем выполнен достаточно большой объем работы, на высоком уровне. Разработанный шариковый холодный замедлитель может с успехом быть использован на нейтронных источниках средней и малой интенсивности для исследования самого разнообразного круга материалов в довольно широком диапазоне параметра решётки. Из содержания работы можно понять, что она была выполнена в рамках большого проекта по созданию комплекса холодных замедлителей на реакторе ИБР-2, а также в рамках международной коллаборации, однако, вклад автора при совместных работах по данной теме был определяющим.

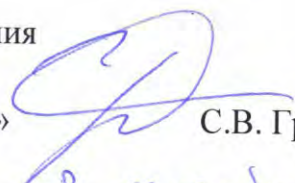
Результаты диссертации Булавина М.В. опубликованы в 23 статьях, 10 из

которых входят в международные системы цитирования Web of Science и Scopus, технические решения работы защищены патентом. Кроме того, результаты работы были представлены на российских и международных конференциях.

Научная новизна, актуальность, практическая значимость полученных результатов, обоснованность и достоверность научных положений и выводов работы не вызывает сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Работа Булавина М.В. выполнена на высоком научном уровне и полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
зам. директора по международной деятельности,  
старший научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения  
Петербургского института ядерной физики  
им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»

  
С.В. Григорьев  
«8» сентября 2017 г.

Почтовый адрес:  
188300, Ленинградская обл.,  
г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д.1  
Тел.: +7(81371)46561  
E-mail: grigor@lns.pnpi.spb.ru

Ученый секретарь  
ФГУБУ «Петербургский институт  
ядерной физики им. Б.П. Константинова»  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Кандидат физ.-мат. Наук



  
С.И. Воробьев