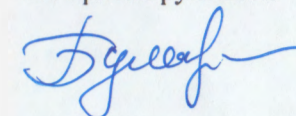


15.06.17

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3-2017-27

На правах рукописи



БУЛАВИН

Максим Викторович

ШАРИКОВЫЙ ХОЛОДНЫЙ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ  
РЕАКТОРА ИБР-2: НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ  
И ПРИМЕНЕНИЯ

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы  
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Отпечатано методом прямого репродуцирования  
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 19.05.2017.

Формат 60х90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,62. Уч.-изд. л. 2,06. Тираж 100 экз. Заказ № 59116.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)

Дубна 2017

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна

Научный руководитель: **Шабалин Евгений Павлович**  
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник ЛНФ ОИЯИ

Научный консультант: **Куликов Сергей Александрович**  
кандидат физико-математических наук, начальник отдела НЭОКС ЛНФ ОИЯИ

Официальные оппоненты: **Сидоркин Станислав Федорович**, кандидат физико-математических наук, и.о. зав. сектора импульсных источников нейтронов Лаборатории нейтронных исследований ФГБУН «Институт ядерных исследований» РАН

**Григорьев Сергей Валентинович**, доктор физико-математических наук, зам. директора по международной деятельности ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» НИЦ «Курчатовский институт»

Ведущая организация: **ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва**

Защита состоится 15 октября 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.06 при Международной межправительственной организации Объединенном институте ядерных исследований по адресу: 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ и на странице [http://www.info.jinr.ru/dissertation/DC\\_flnr\\_flnp.htm](http://www.info.jinr.ru/dissertation/DC_flnr_flnp.htm)

Автореферат разослан 30 мая 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 720.001.06,  
кандидат физ.-мат. наук



А.Г. Попеко

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы.

На импульсном быстром реакторе ИБР-2 (Дубна, ОИЯИ) для получения тепловых нейтронов используют замедлители на основе воды с температурой, близкой к комнатной [1]. До последнего времени все физические исследования на ИБР-2 ограничивались возможностями этих водяных замедлителей, которые обеспечивают высокую интенсивность нейтронов в диапазоне длин волн до  $3 \text{ \AA}$ . В тоже время, низкая интенсивность потока более длинноволновых нейтронов, генерируемых таким замедлителем, не позволяет проводить эксперименты с холодными ( $\lambda > 4 \text{ \AA}$ ) нейтронами, с приемлемой статистической точностью измерений и за «разумное время». Наличие стационарно действующего холодного замедлителя обеспечило бы значительно более эффективное проведение исследований строения атомной и магнитной структуры и физических свойств перспективных наноматериалов, слоистых магнетиков, биологических и полимерных объектов, геологических образцов и других длиннопериодических систем. Еще большего эффекта можно добиться, объединяя вместе водяной и холодный замедлители, т.е. реализуя биспектральный замедлитель нейтронов, способный генерировать высокоинтенсивные пучки медленных нейтронов в широком диапазоне длин волн.

В настоящее время на реакторе ИБР-2 холодные нейтроны востребованы сразу на нескольких действующих спектрометрах, в том числе, на рефлектометре РЕМУР [2] и дифрактометре для количественного анализа текстуры СКАТ [3]. В частности, на установке РЕМУР проводятся эксперименты, направленные на получение микропучка холодных нейтронов при прохождении через слоистый волновод, а также работы по пространственному расщеплению пучка холодных нейтронов при отражении от магнитно-неколлинеарной структуры. На дифрактометре СКАТ увеличение интенсивности пучка холодных нейтронов может значительно улучшить условия для проведения текстурного анализа образцов горных пород. Таким образом, увеличение потока холодных нейтронов, за счет применения криогенного замедлителя, вполне актуально для целого ряда действующих на ИБР-2 экспериментальных установок.

Для проекта холодного замедлителя на реакторе ИБР-2 предпочтение было отдано варианту с загрузкой камеры замороженными шариками из ароматического углеводорода – мезитилена путем пневмотранспорта по криогенному трубопроводу.

**Целью диссертационной работы** является разработка холодного замедлителя нейтронов для пучков №7, 8, 10 и 11 ИБР-2, на основе твердых шариков из смеси ароматических углеводородов, и демонстрация улучшений, которые он дает при работе на физический эксперимент на спектрометрах реактора.

Для достижения указанной цели в данной работе были поставлены следующие основные **задачи**:

1. Теоретически и экспериментально изучить пневмотранспорт твердых шариков в прямом цилиндрическом трубопроводе

15.06.17 Е.р. О.И. №20/3  
научно-тех. библиотека

2. Разработать методику проверки работоспособности пневмотранспортного принципа загрузки шариков в камеру холодного замедлителя и определить оптимальный режим загрузки на основе расчетов и эксперимента
3. Проверить параметры пневмотранспорта замороженных шариков из ароматического углеводорода мезитилена по трубопроводу сложной конфигурации до камеры замедлителя реактора ИБР-2 для выведенных пучков №№7, 8, 10 и 11
4. Продемонстрировать улучшения, которые предоставляет шариковый холодный замедлитель пользователю при работе на физический эксперимент на спектрометрах РЕМУР и СКАТ ИБР-2

#### Научная новизна и практическая значимость результатов

- 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.

#### Положения, выносимые на защиту

1. Теоретические расчеты и эксперименты на лабораторном и полномасштабном испытательных стендах позволили выявить основные особенности и доказать возможность пневмотранспортировки замороженных шариков из смеси ароматических углеводородов в камеру холодного замедлителя потоком гелия при температуре 30 К по трубопроводу сложной конфигурации
2. Значения параметров оптимального режима загрузки шариков в камеру холодного замедлителя в направлении пучков №№ 7, 8, 10 и 11 ИБР-2: 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/сек, температура транспортирующего гелия при загрузке шариков 80-85 К. Выбранные параметры позволили обеспечить оперативную загрузку камеры замедлителя за время около 4 ч, без разрушения шариков в процессе пневмотранспорта
3. Использование холодного замедлителя привело к существенному увеличению (4-10 раз) дифференциальной плотности потока холодных нейтронов на

спектрометрах реактора ИБР-2 по сравнению с водяным замедлителем, благодаря чему:

- на рефлектометре РЕМУР время измерения спектра микропучка нейтронов снизилось в 10 раз. Время измерения спектров в эксперименте по пространственному расщеплению пучка снизилось в 4-10 раз, а доступный диапазон длин волн увеличился с 8 Å до 16 Å, что позволило сократить время измерения еще как минимум в 2 раза
- время измерения дифракционных спектров горных пород, возможно либо сократить в 3-4 раза, сохранив при этом аналогичную статистику нейтронов по сравнению с водяным замедлителем, либо при том же времени измерений существенно – в 2 раза – уменьшить статистические погрешности получаемых результатов

**Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Все результаты, приведенные в диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке задач, решаемых в рамках диссертационной работы, в проведении теоретических оценок и расчетов, 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.

#### Апробация диссертации

Результаты, вошедшие в диссертацию, были доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: 2nd Joint seminar JINR – Romania on neutron physics for investigation of nuclei condensed matter and life science (JSJR) (Baia Mare, Romania, 2007 г.); конференция молодых ученых и специалистов ОМУС 2009 (Дубна, 2009 г.); конференция молодых ученых и специалистов ОМУС 2011 (Дубна, 2011 г.); научная школа «Приборы и методы экспериментальной ядерной физики» (Дубна, 2010 г.); инновационный форум «Селигер 2010» (о. Селигер, 2010 г.); 45 Зимняя школа ПИЯФ РАН, Секция Физики Конденсированного состояния (Гатчина, 2011 г.); XXI совещание по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния (РНИКС–2010), РНЦ «Курчатовский институт» (Москва, 2010 г.); 5th European conference on neutron scattering (ECNS) (Prague, Czech Republic, 2011 г.); 3rd Joint seminar JINR – Romania on neutron physics for investigation of nuclei condensed matter and life science (JSJR) (Targoviste, Romania, 2011 г.); 46th Crystallography course «The future of dynamic structural science» (Erice, Italy, 2013 г.); XXI International collaboration on advanced neutron sources (Mito, Ibaraki, Japan, 2014 г.); VI European conference on neutron scattering (ECNS2015) (Zaragoza, Spain, 2015); 2nd Research coordination meeting related to the IAEA coordinated research project 1916 / F1.20.26 on advanced moderators for intense cold neutron beams in material research, Vienna, Austria, 2016.

### Публикации

По теме диссертации опубликованы 23 печатные работы, из них 10 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и 1 патент.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка. Полный объем составляет 149 страниц машинописного текста, в том числе 64 рисунка, 4 таблицы, 123 библиографические ссылки.

### Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту и приведен личный вклад автора.

В **первой главе** содержится обзор и анализ отечественных и зарубежных литературных данных по использованию различных материалов для холодных замедлителей нейтронов. Отмечено, что ароматический углеводород мезитилен по сравнению с остальными материалами (жидкий водород, лед воды, метан, ароматические углеводороды и т.д.) обладает явными преимуществами при использовании его в качестве материала холодного замедлителя на источниках нейтронов малой и средней интенсивности. Загрузка мезитилена в камеру замедлителя осуществляется в виде твердых замороженных шариков. Шариковая форма, по сравнению с замороженным куском мезитилена, позволяет быстрее охлаждать камеру замедлителя, а также обеспечивать одну и ту же температуру по всему объему вещества, что благоприятно отражается на получаемом спектре нейтронов. Радиолитический водород, образующийся в мезитиле под действием облучения, легко выходит из объема шариков и распространяется по всему объему пневмотранспортного трубопровода, не создавая опасного избыточного давления на стенки камеры замедлителя, как в случае с целым куском. И наконец, шариковая форма позволяет производить смену отработанного вещества замедлителя прямо во время работы реактора на мощности, благодаря чему время работы на физический эксперимент может быть практически неограниченным.

Холодный замедлитель нейтронов реактора ИБР-2 (проектное название – «КЗ202»), представляет собой камеру, габаритными размерами 180 мм · 40 мм · 180 мм, заполняемую рабочим материалом в виде замороженных шариков из смеси ароматических углеводородов мезитилена и метаксилола путем пневмотранспорта потоком холодного гелия с температурой около 80-85 К (рис. 1).

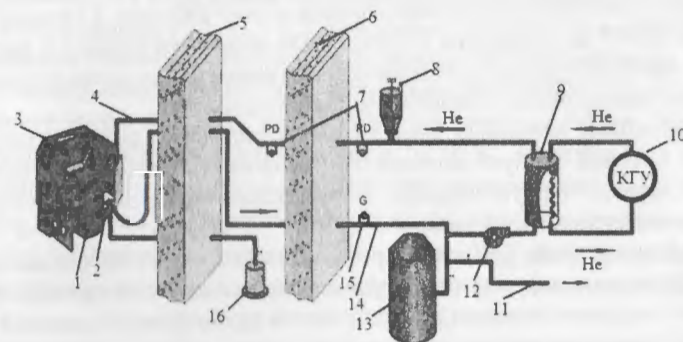


Рис. 1. Шариковый холодный замедлитель нейтронов реактора ИБР – 2:

1 – водяной замедлитель, 2 – камера холодного замедлителя, 3 – активная зона ИБР-2, 4 – пневмотранспортный трубопровод (первый контур охлаждения), 5,6 – биологическая защита, 7 – датчики движения замороженных шариков в трубе, 8 – дозирующее устройство, 9 – теплообменник, 10 – криогенная гелиевая машина (КГУ) и второй контур охлаждения, 11 – трубопровод для аварийного отвода водорода, 12 – газодувка, 13 – газольдер, 14 – трубопровод отвода гелия от камеры замедлителя, 15 – датчики расхода гелия (трубка Пито), 16 – емкость для слива отработанного мезитилена и м-ксилола

Замедлитель состоит из первого и второго контуров охлаждения. Первый контур включает в себя камеру холодного замедлителя (2), пневмотранспортный трубопровод (4), датчики движения замороженных шариков в трубе PD (7) и датчик расхода гелия G, соединенный с трубкой Пито (15), дозирующее устройство (8), газодувку (12) и трубопровод отвода гелия от камеры замедлителя (14). Второй контур охлаждения состоит из криогенной гелиевой установки (КГУ) и трубопроводов подвода и отвода гелия к/от КГУ. После заполнения камеры замедлителя шариками запускают газодувку, и гелий начинает циркулировать в первом контуре охлаждения и через теплообменник (9). Параллельно с этим процессом запускают КГУ и температура гелия в обоих контурах охлаждения начинает понижаться. Трубопроводы двух контуров и теплообменник заключены в вакуумные кожухи для уменьшения передачи тепла из окружающей среды. По криогенному пневмотранспортному трубопроводу (4) охлажденному до температуры 80-85 К осуществляется доставка замороженных шариков из дозирующего устройства в камеру замедлителя, расположенную вблизи активной зоны (3) реактора. В процессе загрузки расход гелия фиксируется датчиком дифференциального давления DXLdp (обозначен на схеме как G), соединенным с трубкой Пито (15). Датчик PD, расположенный в пневмотранспортном трубопроводе, перед участком небольшого подъема (между биологической защитой 5 и 6), кроме расхода гелия фиксирует и образование возможных шариковых пробок или затворов в трубе. Датчик PD, расположенный у дозирующего устройства фиксирует процесс движения шариков внутри трубопровода. Для заполнения камеры замедлителя необходимо загрузить 1 литр (~25000 шт) замороженных шариков. После окончания загрузки камера с шариками охлаждается до рабочей температуры

~30 К. При этой температуре замедлитель может работать в течение всего цикла реактора ИБР-2 на мощности 2 МВт. После остановки реактора, расплавленный рабочий материал удаляется в специальную емкость для слива и утилизации (16), после чего замедлитель готовят к следующему циклу.

Шариковый холодный замедлитель представляет собой сложную систему, создание которой требует поэтапного решения конкретных научно-исследовательских задач, в первую очередь, это исследование пневмотранспорта твердых шариков в камеру замедлителя.

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.

При заполнении камеры замедлителя скорость шариков во время пневмотранспортировки, из-за их малой ударной прочности, не должна превосходить определенного предела, который был определен экспериментально и составляет 4 м/с. В то же время скорость не может быть очень малой величиной в силу ограничений на время загрузки камеры замедлителя и из-за возможного образования заторов у подъемов трассы. Поэтому одним из критических моментов при разработке и проектировании системы пневматической транспортировки шариков является определение характера и скорости их движения по пневмотрассе, начиная с этапа разгона после их введения в трубопровод через специальный шлюз, используемый в качестве дозирующего устройства.

На первом этапе рассматривается движение шара в цилиндрической прямой идеальной трубе с гладкими стенками (размер шероховатости стенок на 3-4 порядка меньше диаметра шарика) для двух случаев: при отсутствии вращения шара и только лишь скольжении и, наоборот, при его качении с полным отсутствием скольжения. Уравнение для скольжения при отсутствии вращения записывается следующим образом [4]:

$$\frac{dv_{ball}}{dt} = -g(\sin\alpha + k\cos\alpha) + C_1 C_x \left(\frac{v}{v_{gas}}, Re_{pipe}\right) + k C_1 C_y \left(\frac{v}{v_{gas}}, Re_{pipe}\right), \quad (1)$$

где  $v_{ball}$  – скорость шарика,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\alpha$  – угол наклона,  $k$  – коэффициент трения скольжения,  $v_{gas}$  – среднее значение скорости потока газа по сечению трубы,  $\rho_{gas}$  и  $\rho_{ball}$  – плотности газа и шарика,  $R_{ball}$  и  $d_{ball}$  – радиус и диаметр шарика,  $C_x$ ,  $C_y$  и  $C_m$  – безразмерные коэффициенты аэродинамических сил и момента:  $C_x = \frac{2F_x}{\rho_{gas} v_{gas}^2 \pi R_{ball}^2}$ ,  $C_y = \frac{2F_y}{\rho_{gas} v_{gas}^2 \pi R_{ball}^2}$ ;  $F_x$  и  $F_y$  – продольная и нормальная составляющие аэродинамической силы,  $C_1 = 0,75 \left(\frac{\rho_{gas} v_{gas}}{\rho_{ball} d_{ball}}\right)$ ,  $Re_{pipe}$  – число Рейнольдса, рассчитанное по средней скорости газа и диаметру трубы  $D_{pipe}$ . Уравнение при вращении и отсутствии скольжения выглядит следующим образом:

$$\frac{dv_{ball}}{dt} = \frac{5}{7} [C_1 C_x - g \sin\alpha - C_1 C_m], \quad (2)$$

где  $C_m = \frac{16M_z}{\rho_{gas} v_{gas}^2 \pi d_{ball}^3}$ ,  $M_z$  – момент, действующий на шарик со стороны потока газа.

Из уравнений (1) и (2) путем численного моделирования определяли безразмерные коэффициенты  $C_x$ ,  $C_y$  и  $C_m$ , требуемые для расчета скорости шарика по трубе, начиная с момента его старта и до выхода на максимальную скорость. При расчете использовали следующие геометрические параметры и параметры потока: диаметр трубы  $D_{pipe} = 17$  мм, диаметр шарика  $d_{ball} = 5$  мм, температура несущего газа азота на входе в пневмотрассу  $T = 300$  К, давление газа  $P = 1,01325$  бар с постоянным объемным расходом  $Q = 1,8$  л/с (скорость газа  $v_{gas} = 8$  м/с) или  $Q = 2,5$  л/с ( $v_{gas} = 11$  м/с). Скорость движения шарика задавалась в диапазоне  $0 \leq v_{ball} \leq v_{gas}$ . Шарик сферически симметричен. Все расчеты проводились в системе координат, связанной с центром шарика. Результаты приведены на рисунке 2.

Трение о стенку трубы и момент сил, действующих со стороны газа, приводят к вращению шарика. При реальных значениях коэффициента трения, проскальзывание шарика без его вращения возможно только на небольшом отрезке пути в самом начале траектории его движения. В связи с этим, далее будет рассматриваться только случай качения шарика без проскальзывания.

Полученные значения коэффициентов  $C_x$ ,  $C_y$  и  $C_m$  использовались при расчете скорости движения шарика в зависимости от времени его движения в трубе. Результаты приведены на рис. 3.

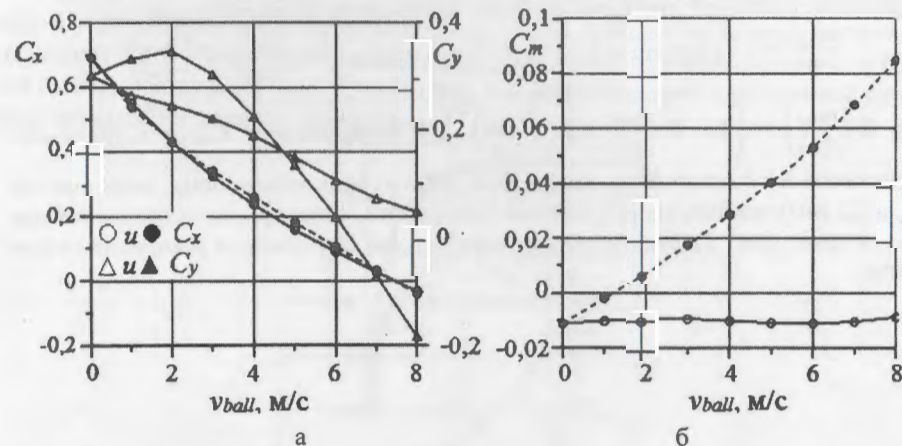


Рис. 2. Зависимости коэффициентов аэродинамических сил и момента, действующих на шарик, от скорости его движения при скорости газа 8 м/с: а – коэффициенты продольной  $C_x$  (кружки) и ортогональной  $C_y$  (треугольники) составляющих аэродинамических сил; б – коэффициент момента аэродинамических сил  $C_m$ . Темные символы соответствуют качению шарика без проскальзывания, светлые – полному отсутствию вращения и только скольжению.

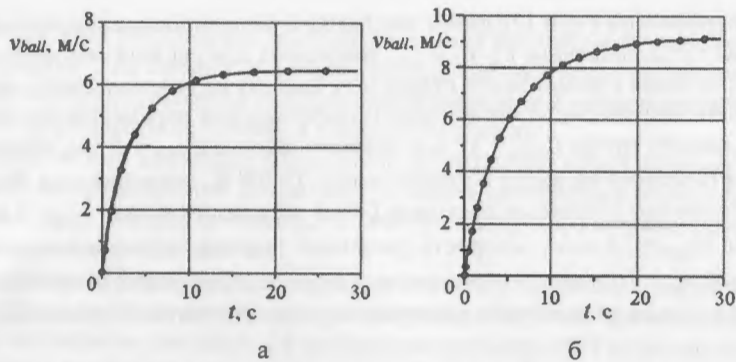


Рис. 3. Зависимость скорости шарика от времени его движения в трубе при качении без проскальзывания: а – при скорости газа 8 м/с, б – при скорости газа 11 м/с.

На рисунке 4 представлена зависимость коэффициента  $C_x$  для скоростей газа 8 и 11 м/с от относительной скорости шарика  $v_{ball}/v_{gas}$ . Видно, что зависимости для разных скоростей газа практически совпадают. То же самое справедливо и для коэффициентов  $C_y$  и  $C_m$ . Это позволяет разработать упрощенную модель движения шарика по трубе, в которой функции  $C_x$ ,  $C_y$  и  $C_m$  от относительной скорости шарика можно аппроксимировать параболической зависимостью. Тогда уравнение движения при качении будет иметь легко интегрируемый вид:

$$\frac{dv_{ball}}{dt} + 0,714gsina = 0,525 \left( \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ball}d_{ball}} \right) v_{gas}^2 C_{x0} \left( Re, \frac{d_{ball}}{D_{pipe}} \right) \cdot \Phi \left( \frac{v_{ball}}{v_{gas}} \right) \quad (3)$$

где  $\Phi \left( \frac{v_{ball}}{v_{gas}} \right) = \left( 1 - \bar{a} \cdot \frac{v_{ball}}{v_{gas}} + b \cdot \left( \frac{v_{ball}}{v_{gas}} \right)^2 \right)$ , а коэффициент  $C_{x0} = C_x(0) + C_m(0)$ .

Константы  $\bar{a}$  и  $b$  могут быть определены либо из конкретного вида зависимостей  $C_x$  и  $C_m$ , полученных по результатам численного моделирования обтекания шарика в трубе (рис. 2), либо из экспериментальной зависимости ускорения от скорости.

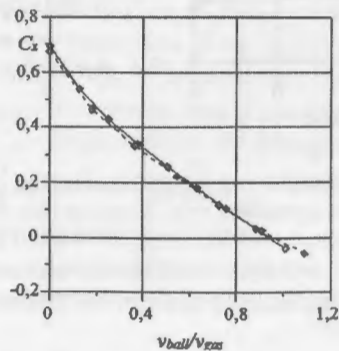


Рис. 4. Коэффициент  $C_x$  продольной составляющей аэродинамической силы, действующей на шарик при скорости газа  $v_{gas} = 8$  м/с – сплошная линия и светлые квадраты и  $v_{gas} = 11$  м/с – пунктир и темные квадраты, в зависимости от относительной скорости шарика.

В сделанных приближениях решение уравнения (3) при  $b \neq 0$  выглядит так:

$$\bar{v}_{ball} = \frac{Y_- \cdot (\bar{v}_{ball0} - Y_+) - Y_+ \cdot (\bar{v}_{ball0} - Y_-) \cdot \exp(\gamma t)}{(\bar{v}_{ball0} - Y_+) - (\bar{v}_{ball0} - Y_-) \cdot \exp(\gamma t)} \quad (4)$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $\bar{v}_{ball} = \frac{v_{ball}}{v_{gas}}$  – относительная скорость

шарика,  $\bar{v}_{ball0} = \frac{v_{ball}(t=0)}{v_{gas}}$ ,  $Y_{\pm} = \frac{\bar{a} \pm \sqrt{\bar{a}^2 + 4b \left( \frac{gsina}{1.4f_{x0}} - 1 \right)}}{2b}$ ,  $f_{x0} = 0,525 \cdot \left( \frac{\rho_{gas}}{\rho_{ball}d_{ball}} \right) v_{gas}^2 C_{x0}$ ,

$$\gamma = - \frac{f_{x0}}{v_{gas}} \sqrt{\bar{a}^2 + 4b \left( \frac{gsina}{1.4f_{x0}} - 1 \right)}$$

Для пройденного пути получим выражение:

$$x(t) = \left( \frac{v_{gas}}{\gamma} \right) \cdot (Y_+ - Y_-) \cdot \ln \left( \frac{(\bar{v}_{ball0} - Y_-) \cdot \exp(\gamma t) + Y_+ - \bar{v}_{ball0}}{Y_+ - Y_-} \right) + Y_- \cdot v_{gas} t \quad (5)$$

Если  $b = 0$  (такое приближение можно использовать в любом узком интервале скоростей шарика), то решение уравнения (3) имеет простой вид:

$$v_{ball} = v_{ass} + (v_{ball}(0) - v_{ass}) \cdot \exp(\gamma_0 t), \quad (6)$$

где  $\gamma_0 = - \frac{\bar{a} f_{x0}}{v_{gas}}$ ,  $v_{ass} = \frac{v_{gas}}{\bar{a}} \left( 1 - \frac{gsina}{1.4f_{x0}} \right)$ .

Путь, пройденный шариком, выразится теперь, как

$$x(t) = v_{ass} t - \frac{(v_{ball}(0) - v_{ass})(1 - \exp(\gamma_0 t))}{\gamma_0} \quad (7)$$

Сравнение приближенных аналитических решений с численными для нулевого угла наклона трубы к горизонту дано на рис. 5. В приближенных расчетах константы  $\bar{a}$  и  $b$  определены из численной зависимости коэффициентов  $C_x$  и  $C_m$  для катящегося шарика (рис. 2, 4). Видно, что аналитический и численный расчеты показывают хорошее совпадение.

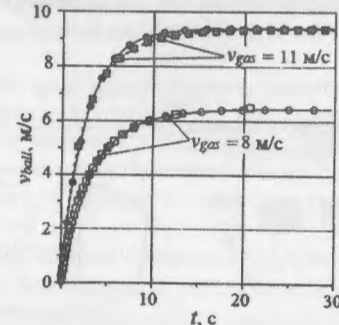


Рис. 5. Сравнение зависимостей скорости шарика (в размерных величинах) от времени при его качении в трубе без проскальзывания (кривая отмечена кружочками) при скоростях газа 8 и 11 м/с. Кружки – численное моделирование, квадраты – аналитическое решение уравнения (3)

Представленная выше численная модель движения шарика требовала экспериментальной проверки для оценки влияния неучтенных факторов: нерегулярности движения шарика, его колебаний и хаотических отклонений от движения вдоль оси трубы, шероховатости стенок трубы, отклонения от шарообразной формы и т.д. Исходными данными для определения скорости и координаты во времени являются зависимости ускорения шарика от параметров его движения в

потоке газа. Поэтому в экспериментальных исследованиях основная задача состояла в определении зависимости ускорения шарика от его скорости при движении по трубе. Эксперименты проводились на лабораторном стенде, оснащем стеклянной трубой диаметром 17 мм и стеклянными шариками диаметром 5 мм. Транспортировка осуществлялась потоком газообразного азота при комнатной температуре. Газодинамическое и кинетическое подобие экспериментов на этой установке и опытов по реальной транспортировке шариков из твердого метилена потоком гелия при температуре 80-85 К, обеспечивается близостью значений чисел Фрода ( $\frac{\rho_{gas}}{\rho_{ball}d_{ball}}$ ) и чисел Рейнольдса для этих двух случаев ( $Re \sim 5000 \pm 10000$  при скорости газа 6-12 м/с).

Для определения искомой зависимости «скорость-ускорение» использовали метод визуализации движения шарика. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 6. Продольные координаты шарика на всем пути движения в стеклянной трубе длиной 3,6 м регистрировались путем одновременной видеосъемки несколькими цифровыми фотокамерами с частотой кадров 30 Гц и временем экспозиции 1/2000 с. Всего было сделано более сотни пусков, получено более 3000 снимков и видеоклипов. Путем компьютерной обработки снятых видеоклипов определялись средние значения скорости шарика как за время 1/30 с (погрешность  $\pm 0,03$  м/с), так и на любом отрезке пути. На отрезке 0,5 метра погрешность измерения скорости не превышала 1%, а погрешность среднего значения ускорения 0,1 – 0,2 м/с<sup>2</sup>. Параметры движения шарика диаметром 5 мм в стеклянной трубе были измерены при трех значениях средней скорости газа 6, 8 и 11 м/с. Скорость газа контролировалась с помощью ротаметра с точностью около 5%. Ротаметр градуировался как по скорости снижения давления газа в накопительной емкости, так и дифференциальным манометром с трубкой Пито.

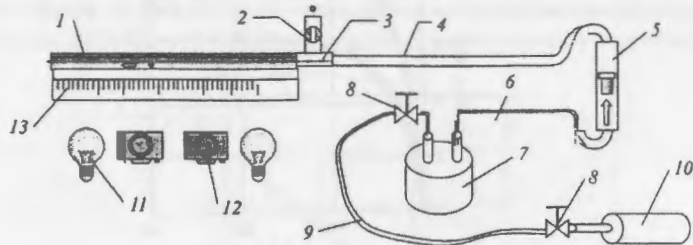


Рис. 6. Упрощенная схема стенда для измерения параметров движения шарика в стеклянной трубе в потоке газа: 1 – стеклянная трубка диаметром 17,3 мм и длиной – 3,6 м; 2,3 – шлюз загрузки шарика с шаровым вентилем; 4 – гибкий участок подающего газопровода с малым давлением, диаметром 14 мм и длиной 5 м; 5 – ротаметр; 6 – участок газопровода с большим гидравлическим сопротивлением; 7 – накопительная емкость объемом 63 л (совместно с нагрузкой 6 служит фильтром колебаний расхода газа); 8 – редукторы, понижающие расход; 9 – участок подающего газопровода большого давления (около 10 бар); 10 – баллон со сжатым воздухом (до 60 бар); 11 – осветительные прожекторы; 12 – видеокамера; 13 – измерительная линейка

Результаты опытов по пневмотранспорту стеклянных шариков на установке со стеклянной трубой представлены на рис. 7а-7в. На этих же рисунках показаны теоретические расчеты для прямой круглой трубы с идеальными стенками.

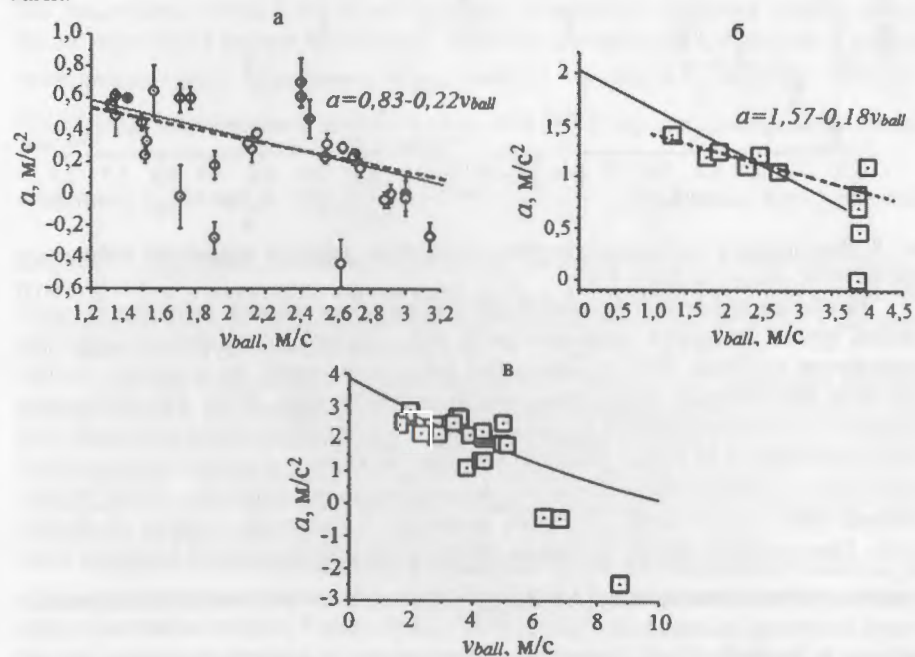


Рис. 7. Зависимость ускорения стеклянного шарика диаметром 5 мм от его скорости при качении в стеклянной трубе диаметром 17 мм при скорости газа азота 6 м/с (а), 8 м/с (б) и 11 м/с (в). Кружки и квадраты – эксперимент (размер квадратов примерно соответствует погрешности измерений), сплошные линии – расчет для гладкой трубы, пунктирные линии и уравнения на графиках – линейная аппроксимация экспериментальных данных

Как видно из рис. 7, расчетные ускорения шарика при его качении, усредненные по многим пускам, при заданной его скорости согласуются с экспериментом (в пределах погрешности измерений) только в узком диапазоне ~ 20-40% от скорости газа. При скорости шарика ~ 40-50% от скорости газа ускорение падает быстрее, чем предсказывает теория, и уже при скорости около ~ 50% от скорости газа становится даже отрицательным. Следует отметить, что разброс экспериментальных точек на рисунках связан не столько с погрешностью измерений, сколько с нерегулярностью движения шариков. Из рис. 7, 8 видно, что практически во всем диапазоне скоростей движение шарика нерегулярно, подвержено то ускорению, то замедлению.

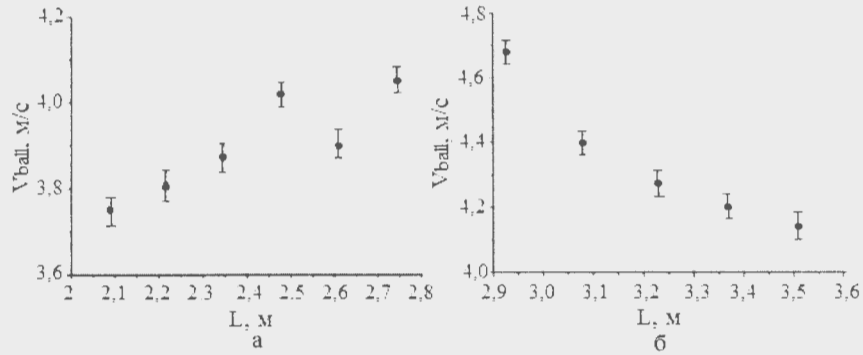


Рис. 8. Два примера (а, б) нерегулярного поведения скорости шарика на небольшом отрезке пути; скорость газа – 8 м/с.

Наиболее вероятной причиной потери скорости шарика является шероховатость трубы. Во время движения часто наблюдалось, что шарик за короткие промежутки времени (0,03 с) переходил вверх-вниз-вверх по диаметру трубы, при этом значительно теряя продольную скорость (рис. 8 б), т.е. испытывал прыжки и отскоки в процессе движения как раз из-за шероховатости стенок. При попадании шарика на какое-либо препятствие (назовем его «порогом») он может приобрести составляющую скорости, направленную по нормали к стенке трубы. Наличие этой компоненты скорости приводит к отскокам шарика от стенок трубы. При отскоке потеря шариком продольной составляющей скорости описывается уравнением  $v_x \cong v_0 \left(1 - 2\chi \sqrt{\frac{h}{d_{ball}}}\right)$ , а прирост нормальной составляющей –  $v_y \cong 2v_0 \sqrt{\frac{h}{d_{ball}}} (1 + k_v)$ , где  $h$  – высота порога,  $k_v$  – коэффициент восстановления скорости при ударе (зависит от механических свойств материала шарика и стенки и толщины стенки),  $\chi = (1 + k_v) \cdot \mu$ ,  $\mu$  – динамический коэффициент трения скольжения, действующий во время контакта со стенкой при столкновении. Например, при  $h = 20$  мкм и  $d_{ball} = 5$  мм ортогональная скорость составит 0,22 от начальной скорости шарика, а его продольная скорость – 0,91 от начальной скорости.

Очевидно, что при наличии ряда порогов на пути движения шарика нельзя ожидать установившейся скорости. Конечная скорость шарика будет случайной величиной, распределение которой зависит от длины пути, скорости газа и расположения и величины порогов. При этом, система уравнений для максимального  $v_0$  и минимального  $v_{x,\infty}$  значений скорости шарика при периодическом расположении «низких» порогов может быть записана следующим образом:

$$\Delta v_x = v_0 - v_{x,\infty} = (v_{ass} - v_{x,\infty})(1 - \exp(\gamma_0 t)) \quad (8)$$

$$L - l = v_{ass} t - \frac{(v_{x,\infty} - v_{ass})(1 - \exp(\gamma_0 t))}{\gamma_0} \quad (9)$$

Здесь  $\gamma_0 = -f a_0$ ,  $v_{ass} = \frac{1}{f} \left(1 - \frac{g \sin \alpha}{1,4 a_0}\right)$ ,  $a_0$  – начальное ускорение,  $f$  – размерная константа при неизменной скорости газа,  $L$  – расстояние между порогами,  $l$  –

длина пробега шарика от порога до окончания прыжков. Под «низким» порогом подразумевается, что шарик будет многократно отскакивать только от нижней части трубы («прыжки») или  $\frac{v_y^2}{2g} \leq D_{pipe} - d_{ball}$ , или  $h \leq \frac{g(D_{pipe} - d_{ball})d_{ball}}{2v_0^2(1+k_v)^2}$ . В случае «высокого» порога после одного-двух отскоков от верхней стенки, шарик также перейдет в режим «прыжков». Решение системы (8-9) сводится к одному трансцендентному уравнению относительно  $v_0$ :  $G v_0^2 + \frac{1-\delta}{\gamma} v_0 = L - \frac{v_{ass}}{\gamma} \ln \left(1 - \frac{v_0(1-\delta)}{v_{ass} - v_0 \delta}\right)$ , где обозначено  $G \equiv \frac{v_x}{v_0} \frac{2 v_y}{g v_0 (1-k_v)}$ ,  $\delta \equiv \frac{v_{x,\infty}}{v_0} (1-k_v)$ , а  $v_{x,\infty}$  и  $v_0$  связаны соотношением  $v_{x,\infty} = v_0 \left(1 - 2\chi \sqrt{\frac{h}{d_{ball}}} + \frac{2\sqrt{\frac{h}{d_{ball}}(1+k_v)}}{1-k_v} \left(2\frac{a}{g} - \chi\right)\right)$ , здесь  $a$  и  $g$  – ускорение

шарика и ускорение свободного падения, соответственно. Тогда при  $h/d_{ball} = 0,001$ ,  $L = 9$  м и значениях параметров  $a_0$ ,  $k_v$ ,  $\chi$  и  $f$ , характерных для транспорта стеклянного шарика диаметром 5 мм по стальной трубе диаметром 17 мм потоком газа азота со скоростью 6 м/с:  $v_0 = v_{max} = 3,1$  м/с,  $v_{min} = 1,97$  м/с.

Сравним полученные теоретические результаты для идеальной круглой трубы, трубы с шероховатостью поверхности и экспериментально полученные значения скорости и времени движения стеклянного шарика в длинном трубопроводе. Эксперимент с длинной стальной трубой абсолютно идентичен эксперименту со стеклянной трубой, только в данном случае стеклянная труба соединена со стальной трубой длиной 11,4 м и диаметром 16 мм.

Результаты экспериментов в стальной трубе подтверждают выводы результатов эксперимента со стеклянной трубой о хаотичном и нерегулярном движении шариков. На рис. 9 видно явное отсутствие зависимости конечной скорости от времени движения, в отличие от зависимости, изображенной на рисунке треугольниками (расчет для идеально гладкой трубы). Разброс значений конечных скоростей движения по трубе длиной 11,4 м довольно большой и составляет 54-64 % от среднего значения скорости шарика при скорости газа 6-8 м/с. Разброс времени движения оказался на уровне 43 %, что говорит о немонотонности движения единичного шарика. Минимальное и максимальное экспериментальные значения установившейся скорости ( $v_{max} = 3,26$  м/с,  $v_{min} = 1,62$  м/с), например, для скорости газа 6 м/с (рис. 10) хорошо согласуются с теоретическими расчетами скорости нерегулярного движения шарика, приведенными выше ( $v_0 = v_{max} = 3,1$  м/с,  $v_{min} = 1,97$  м/с) и в 1,5 раза отличаются от значений конечной скорости для идеально гладкой трубы. То же самое справедливо и для скоростей газа 8 и 11 м/с.

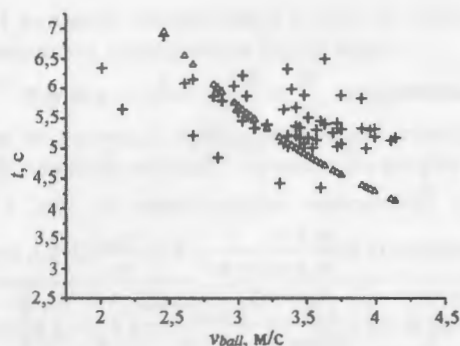


Рис. 9. Диаграмма конечных скоростей ( $v_{ball}$ , м/с) и времени движения шариков ( $t$ , с) на пути 11,4 м. Крестики – эксперимент, треугольники – расчет для идеального трубопровода

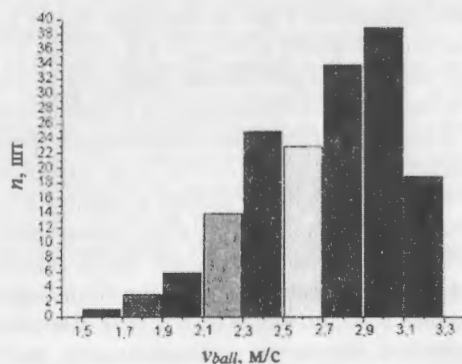


Рис. 10. Распределение конечной скорости движения круглых шариков по трубе длиной 11,4 м при скорости транспортирующего газа 6 м/с ( $n$  – количество шариков в интервале скоростей 0,2 м/с; полное число шариков – 164)

Результаты теоретических расчётов и лабораторных экспериментов позволили предварительно определить такие параметры пневмотранспорта шариков в прямой круглой трубе как диаметр шарика и трубы, зависимость скорости шарика от скорости газа, зависимость скорости шарика от времени его движения, разброс скоростей и времени движения, коэффициенты сопротивления покоящегося шарика, коэффициенты трения скольжения и восстановления скорости при ударе, зависимость ускорения шарика от скорости, среднюю и конечную скорости шарика, скорость газа необходимую для подъема шарика по наклонной трубе и т.д. Однако, полученные предварительные результаты не давали полного и точного ответа на вопрос о том, как движется шарик по криогенному трубопроводу сложной конфигурации, с поворотами или участками подъемов и спусков, которые имеет пневмотранспортный трубопровод реального шарикового холодного замедлителя. Поэтому на следующем этапе был разработан специальный полномасштабный испытательный стенд, который в масштабе 1:1 повторял все основные узлы и системы реального холодного замедлителя. Принцип работы стенда абсолютно идентичен принципу работы замедлителя, описанному в первой главе.

На испытательном стенде холодного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2 было проведено более 40 экспериментов (из них 6 полных загрузок объемом по 1 л), в которых продемонстрирована возможность надежной и быстрой загрузки твердых шариков из ароматических углеводородов в камеру-имитатор (рис. 11) по протяженному трубопроводу сложной геометрии, отработаны технологические и измерительные системы, выработан оптимальный режим загрузки, который позволяет производить полную загрузку камеры замедлителя за время около 3-4 ч при скорости и температуре гелия 11-14 м/с и 80-85 К соответственно. Скорость подачи шариков из дозатора 8 шт/сек.

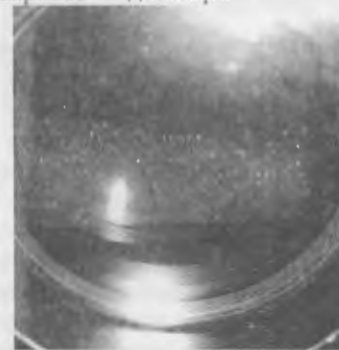


Рис. 11. Снимок камеры во время проведения эксперимента на испытательном стенде холодного замедлителя. Температура внутри камеры 80 К. Загружена половина камеры

Полученные во второй главе результаты позволили создать и ввести в тестовую эксплуатацию шариковый холодный замедлитель нейтронов в направлении пучков №№7, 8, 10 и 11 на реакторе ИБР-2.

**Третья глава** посвящена результатам тестовой эксплуатации и нейтронно-физическим данным холодного замедлителя К3202.

Всего за время опытной эксплуатации осуществлено 15 циклов работы (загрузок камеры) замедлителя на номинальной мощности реактора. Длительность циклов составляла от нескольких часов до ~10,6 суток (~509 МВт·ч).

За время работы были достигнуты следующие параметры:

- 1) время загрузки шариков в камеру замедлителя при расходе гелия 1,5-2 г/с и температуре 80-85К – минимум 4 часа;
- 2) максимальный массовый расход гелия 5,5-6 г/с;
- 3) минимальная температура камеры замедлителя при мощности реактора 2 МВт 32-33 К;
- 4) время работы замедлителя на физический эксперимент – 10 суток.

На рисунке 12 приведены спектры, полученные на рефлектометре РЕМУР. Из рисунка 12а видно, что диапазон длин волн для спектра нейтронов теплового замедлителя доходит до 8 Å, а для спектра нейтронов от разработанного холодного замедлителя – до 16 Å. Максимум теплового спектра соответствует длине волны 1,1 Å, а максимум спектра нейтронов холодного замедлителя – 2,6 Å. Интенсивность излучения тепловых нейтронов с поверхности холодного замедли-

теля в области 1-2 Å меньше интенсивности с поверхности замедлителя на основе воды комнатной температуры в этой же области всего в три раза. Однако, в диапазоне длин волн от 2 до 4 Å коэффициент выигрыша по интенсивности для холодного замедлителя (рис. 12 б) резко увеличивается (до 8 раз) и примерно равен десяти в диапазоне от 6 до 8 Å. Далее 8 Å сравнение невозможно из-за практически полного отсутствия длинноволновых нейтронов в спектре теплового замедлителя.

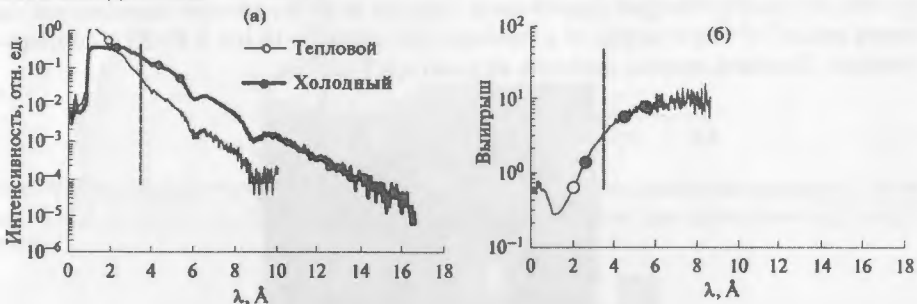


Рис. 12. Спектры нейтронов (а) в замедлителе на основе воды комнатной температуры (светлые точки) и холодном замедлителе (черные точки). Точки соответствуют длинам волн, при которых проведен эксперимент с микропучком. Вертикальная штриховая линия показывает длину волны, при которой сравниваются данные эксперимента по пространственному расщеплению пучка. Отношение интенсивностей излучения нейтронов в случаях холодного замедлителя и замедлителя на основе воды комнатной температуры в зависимости от длины волны нейтронов (б).

Для холодного замедлителя КЗ202 была проведена предварительная оценка плотности потока холодных нейтронов ( $2\pi$ -эквивалент с  $\lambda > 4 \text{ \AA}$ ) с его поверхности. Данная оценка основана на измерении плотности потока тепловых нейтронов на реакторе ИБР-2 [5] и измерении спектра нейтронов утечки из холодного шарикового замедлителя КЗ202, проведенном на РЕМУРе. Она оказалась равной  $1,2 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$ , что по своей величине сравнимо с плотностью потока холодных нейтронов на самом высокоинтенсивном импульсном источнике в мире SNS, (Оак-Ридж, США, [6]).

Эксперименты, проведенные на дифрактометре СКАТ по рассеянию нейтронов поликристаллом ванадия (практически чисто некогерентный рассеиватель) также подтвердили существенное увеличение потока нейтронов с длиной волны  $\lambda > 4 \text{ \AA}$ , при использовании криогенного замедлителя из шариков мезитилена (рис. 13).

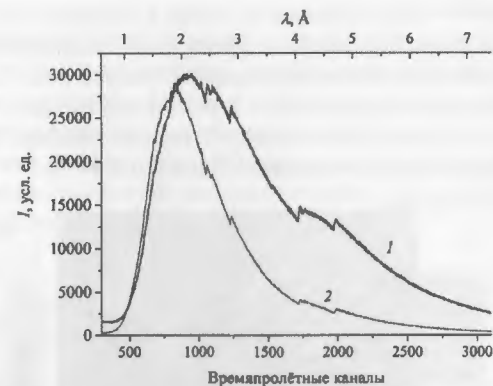


Рис. 13. Экспериментальный нейтронный спектр от стандартного образца поликристаллического ванадия, используемого для калибровки спектрометра СКАТ: 1 – холодный замедлитель, 2 – тепловой замедлитель

В четвертой главе проводится анализ эффективности использования шарикового холодного замедлителя ИБР-2 при проведении рефлектометрических и дифракционных исследований. В частности, представлены результаты экспериментов по получению микропучка нейтронов и по пространственному расщеплению пучка холодных нейтронов, выполненных на рефлектометре РЕМУР, пучок №8 ИБР-2, а также результаты исследования фазового состава и текстуры полиминеральной горной породы – сланца, проведенного на дифрактометре СКАТ, пучок №76 ИБР-2.

#### Получение микропучка холодных нейтронов.

На рис. 14 представлено двумерное распределение интенсивности нейтронов в зависимости от длины волны и угла скольжения рассеянного пучка при угле скольжения начального пучка  $\theta_i = 7,68$  мрад. Горизонтальные линии соответствуют направлениям прямого пучка, плоскости образца и зеркально отраженного пучка. Прямой и отраженный пучки перекрыты поглощающими нейтроны пластинками из Cd. Внизу виден интенсивный преломленный пучок, который при малых длинах волн стремится к направлению прямого пучка, а при увеличении длины волны приближается к направлению плоскости. В области 5 Å можно видеть три вертикально вытянутых пучка, положение которых обозначено эллипсами и стрелками с индексами  $n = 0, 1, 2$ . Это – микропучки резонансов соответствующих порядков  $n$ .

Главным результатом здесь является то, что данные для измерения спектра микропучков холодных нейтронов, впервые полученных при помощи холодного замедлителя, были накоплены за время всего трое суток (один спектр измеряли за одни сутки), т.е. в 10 раз быстрее по сравнению с тепловым замедлителем.

#### Пространственное расщепление пучка холодных нейтронов

На рис. 15 представлено двумерное распределение интенсивности отраженных нейтронов в зависимости от длины волны нейтронов и угла скольжения отраженного пучка  $\theta$ . На рис. 15а показаны экспериментальные данные, полученные на тепловом замедлителе. Можно видеть большую интенсивность зеркально

отражённого пучка «++» без переворота спина в интервале 1-3 Å. Стрелкой показан слабый незеркально отражённый пучок «+-» с переворотом спина. На рис. 15б представлены экспериментальные данные, полученные на холодном замедлителе. Можно заметить, что зеркально отражённый пучок «++» является более интенсивным при больших длинах волн. Стрелкой показан отражённый пучок «+-», который хорошо виден в интервале длин волн 4-7 Å.



Рис. 14. Двумерное распределение интенсивности нейтронов в зависимости от длины волны и угла скольжения рассеянного пучка. Угол скольжения начального пучка равен  $\theta_i = 7.68$  мрад. Овалами и стрелками обозначены микропучки резонансов порядков  $n = 0, 1, 2$ . Прямой и зеркально отраженный пучки блокированы поглощающими пластинами. Пунктирная линия при  $\theta = 0$  соответствует ориентации плоскости образца. Интенсивный пучок вблизи прямого пучка – это преломленный пучок

Сравнивая особенности эффекта пространственного расщепления пучка и свойства замедлителей, можно ясно видеть, что использование холодного замедлителя позволяет улучшить эффект расщепления пучка и сократить время измерения в 4-10 раз (рис. 12). Лучше всего эффект расщепления наблюдается в области больших длин волн (6-7 Å). Десятикратное увеличение интенсивности в этом случае позволяет, без использования анализатора, одновременно регистрировать два пучка «++» и «+-», что позволяет сэкономить время измерения еще как минимум в 2 раза. Кроме того, согласно теории, увеличение максимально доступной длины волны нейтронов в 2 раза при использовании холодного замедлителя уменьшает минимально возможную величину определяемого магнитного поля в 4 раза.

#### Уточняющий текстурный анализ горной породы – метаморфизированного сланца с использованием холодного замедлителя ИБР-2

Эксперименты были проведены на дифрактометре СКАТ с использованием как замедлителя с водой при комнатной температуре, так и холодного шарикового замедлителя. Во время измерения на каждом из замедлителей образец вращался в гониометре СКАТ на полный оборот с шагом 15° для того, чтобы измерить полные полюсные фигуры. Время измерений в каждой угловой позиции образца составляло 2 часа. В результате, спектры дифракции по времени пролета получены в широком диапазоне ориентации образца. В частности, по

спектрам, полученным с использованием холодного замедлителя, были определены минералы, из которых состоит исследованный сланец: альбит, кальцит, кварц, клинохлор (хлорит), и мусковит, структуры которых известны из литературы. Применение холодного замедлителя привело к 4-х кратному увеличению скорости набора информации (рис. 16), что позволило уверенно идентифицировать на дифракционном спектре вклады от слабо рассеивающих или содержащихся в небольшом количестве минералов.

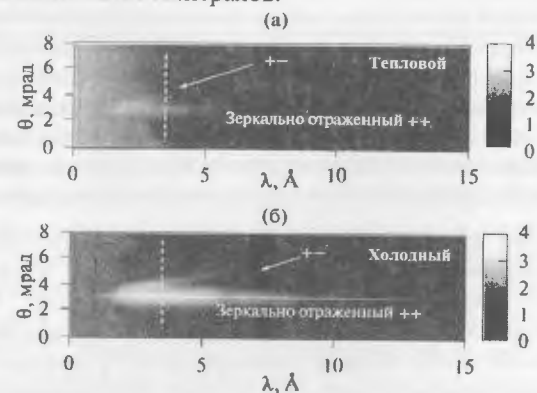


Рис. 15. Двумерное распределение интенсивности отражённых нейтронов в зависимости от длины нейтронов и угла скольжения рассеянного пучка: (а) – тепловой замедлитель, (б) – холодный замедлитель. Вертикальная штриховая линия проведена по длине волны нейтронов 3.40 Å, при которой сравниваются результаты теплового и холодного замедлителей на рис. 12

Это относится, например, к альбиту и хлориту, имеющим ряд характерных дифракционных пиков в диапазоне  $3,5 < d < 3,9$  Å, и кальциту, имеющему единственный дифракционный пик (104), расположенный на  $d \approx 3,03$  Å (рис. 17) и не перекрываемый более интенсивными пиками других минералов. Значения  $R_{wp}$  фактора, определяющего общее качество соответствия структурной модели образца экспериментальным данным, составили 4,3% для случая холодного замедлителя, что 2 раза лучше по сравнению с тепловым замедлителем.

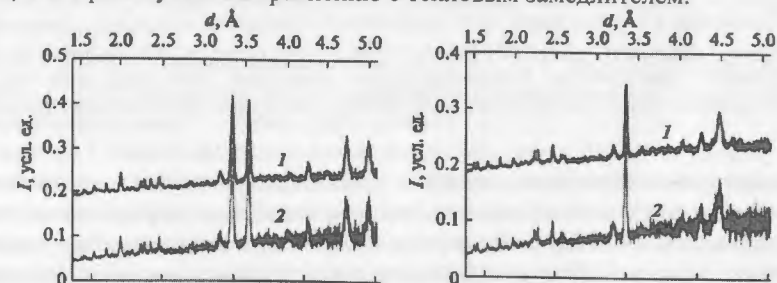


Рис. 16. Спектры, полученные при помощи холодного (1) и теплового (2) замедлителей нейтронов ИБР-2. Точки – измеренные данные, сплошная линия – уточненная модель. На рисунках спектры (2) выглядят более размытыми, чем спектры (1)

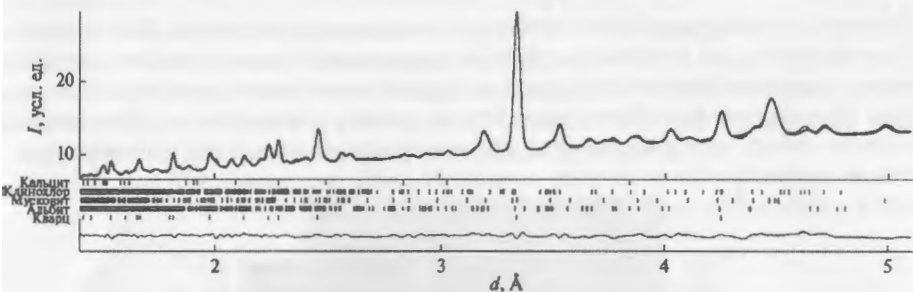


Рис. 17. Сумма всех дифракционных спектров образца сланца, измеренных с холодным замедлителем в каждой угловой позиции. Точки – измеренные данные, сплошная линия – уточненная модель, вертикальные штрихи под спектром – рассчитанные положения дифракционных пиков минералов. Также показана разностная кривая.

Полученные по дифракционным спектрам теплового замедлителя полюсные фигуры минералов, на примере кварца и мусковита, имеют больше локальных минимумов и максимумов полюсной плотности (рис. 18). Полюсные фигуры, измеренные по спектрам холодного замедлителя, наоборот, выглядят более «сглаженными» за счет большей интенсивности и лучшего вычитания фона. Поток нейтронов в позиции образца нейтронного дифрактометра играет важную роль при исследовании особенно острых текстур.

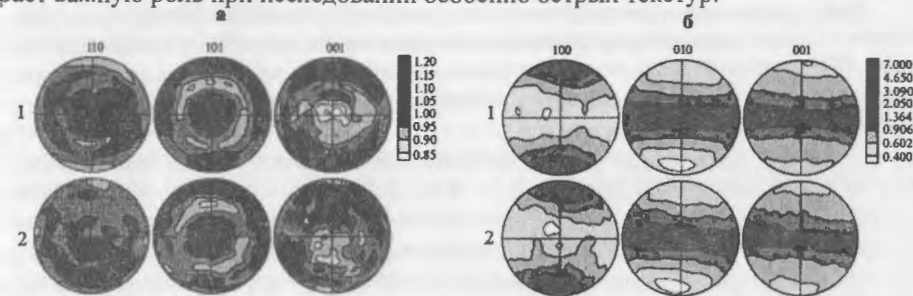


Рис. 18. Полюсные фигуры кварца (а) и мусковита (б) в образце сланца: 1 – результаты, полученные по спектрам холодного замедлителя, 2 – результаты, полученные по спектрам теплового замедлителя. Равноплощадные проекции, линейный масштаб для кварца, логарифмический для мусковита. Нормаль к фолляции образца направлена вертикально

Созданный шариковый холодный замедлитель нейтронов существенно улучшил экспериментальные условия для дифракционных и рефлектометрических экспериментов на ИБР-2. В частности, благодаря значительному увеличению потока холодных нейтронов удалось создать микропучок, наблюдать пространственное расщепление пучка, провести точный анализ минерального состава и преимущественных ориентировок зёрен в многофазной горной породе, в

т.ч. выделить новые дифракционные пики (т.е. получить новую информацию) слабодиссецирующих минералов (альбит, хлорит, кальцит), которые содержатся в породе в небольшом количестве и которые нельзя идентифицировать при помощи теплового замедлителя. Кроме того, все эти эксперименты могут быть проведены за значительно меньшее время.

В заключении изложены основные результаты работы:

1. Теоретически и экспериментально исследован характер движения одиночного шарика в прямой цилиндрической трубе, в том числе нерегулярность его движения, обусловленная шероховатостью стенок трубы. Результаты использованы при разработке полномасштабного испытательного стенда для проверки работоспособности пневмотранспортного механизма загрузки замороженных шариков мезитилена в камеру холодного замедлителя.
2. По результатам экспериментов, проведенных на испытательном стенде, определены параметры оптимального режима загрузки камеры холодного замедлителя, который обеспечивает быструю загрузку шариков с сохранением их целостности: скорость потока гелия в трубе 11-14 м/с, что обеспечивает среднюю скорость шариков вещества замедлителя 2,5 - 3 м/с; темп подачи шариков из дозатора - до 8 шариков в секунду; температура транспортирующего гелия при загрузке шариков 80-85 К. Установлено, что максимальное время работы холодного замедлителя на физический эксперимент на мощности реактора 2 МВт составляет 10 суток.
3. Эксперименты на выведенных пучках нейтронов ИБР-2 показали, 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.

#### Список использованных источников

1. Гундорин, Н.А. Гребенчатый замедлитель / Н.А. Гундорин, В.М. Назаров // Сообщения Объединенного Института Ядерных Исследований. – 1980. – Р3-80-721. – 10 с.
2. Спектрометр поляризованных нейтронов РЕМУР на импульсном реакторе ИБР-2 / В.Л. Аксенов [и др.] // Сообщения Объединенного Института Ядерных Исследований. – 2004. – Д13-2004-47. – Р. 37
3. The SKAT texture diffractometer at the pulsed reactor IBR-2 at Dubna: experimental layout and first measurements / K. Ullemeyer [et al.] // Nuclear instruments and methods in physics research, section A. – 1998. – V. 412, №1. – P. 8088
4. 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.

5. Golikov, V.V. Dose rates near water moderator of the IBR-2 reactor: experiment and analysis / V.V. Golikov, E.N. Kulagin, E.P. Shabalin // JINR communications. – 2002. – E16-2002-79. – p.14.
6. Mammosser, J. Spallation Neutron Source: status and upgrade plans / J. Mammosser // Proceedings of SRF2009. – 2009. – p. 22.

#### Основные публикации автора

1. Current status of development advanced pelletized cold moderators for the IBR-2M research reactor / M. Bulavin, A. Beliakov, S. Kulikov, K. Mukhin, E. Shabalin and A. Verhoglyadov // Physics of particles and nuclei, letters. – 2013. – Vol. 10. – №2. – P. 230-235.
2. 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.
3. Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2 / М.В. Булавин, В.Д. Ананьев, А.А. Беляков, А.Е. Верхоглядов, С.А. Куликов, К.А. Мухин и Е.П. Шабалин // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, №2. – С. 131-134.
4. 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.
5. 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.
6. Пат. 2492538 Российская Федерация, МПК G 21 K 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.
7. Possibility of loading the chamber of the “central” pelletized cold moderator for IBR-2 reactor beams 1, 4-6, and 9 / M.V. Bulavin, A.A. Belyakov, A.E. Verkhoglyadov, V.A. Skuratov, I.A. Smelyansky, S.A. Kulikov, A.A. Kustov, K.A. Mukhin, A.A. Lyubimtsev, A.P. Sirotin, V.K. Shirokov and T.B. Petukhova // Physics of particles and nuclei letters. – 2016. – Vol. 13, №6. – pp. 774-781.
8. Использование криогенного замедлителя на нейтронном рефлектометре РЕ-МУР / М.В. Булавин, С.В. Кожевников, В.Д. Жакетов, А.В. Петренко, А.Е. Верхоглядов, С.А. Куликов, Е.П. Шабалин // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – №1, с. 5-14.

9. 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.
10. 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.

Получено 18 мая 2017 г.

1. ... ..

2. ... ..

3. ... ..

4. ... ..

5. ... ..

6. ... ..

7. ... ..

8. ... ..