

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 720.001.06  
в Международной межправительственной организации  
Объединенный институт ядерных исследований

№242 от 6 октября 2017 года

### Присутствовали:

Председатель совета:	Оганесян Ю.Ц.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Зам. председателя совета:	Аксенов В.Л.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Ученый секретарь совета:	Попеко А.Г.	кандидат физ-мат. наук	01.04.16

### Члены совета:

Авдеев М.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Апель П.Ю.	доктор хим. наук	01.04.01
Балагуров А.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Белушкин А.В.	доктор физ.-мат. наук	01.04.07
Гледенов Ю.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Головков М.С.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Дмитриев С.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Изосимов И.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Иткис М.Г.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Пенионжкевич Ю.Э	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Приезжев В.Б.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Реутов В.Ф.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Скуратов В.А.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Утенков В.К.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Шабалин Е.П.	доктор физ.-мат. наук	01.04.01

**Оганесян Ю.Ц.:** Рассматриваем защиту диссертации Булавиным Максимом Викторовичем, «Шариковый холодный замедлитель реактора ИБР-2: некоторые аспекты создания и применения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики. Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

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» присутствуют на защите.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва.

Присутствуют 18 из 25 членов совета, в том числе 6 докторов наук по профилю диссертации. Предоставляю слово ученому секретарю для оглашения личного дела соискателя.

**Попеко А.Г.:** Соискатель Булавин Максим Викторович родился в 1985 году. В 2007 году окончил Тульский государственный университет. Все необходимые документы соискателем представлены, размещены на официальном интернет портале диссертационных советов ОИЯИ, автореферат разослан вовремя, диссертация и автореферат представлены в библиотеке ОИЯИ. Проект заключения роздан членам совета.

**Оганесян Ю.Ц.:** Если нет вопросов, слово предоставляется соискателю.

**Куликов С.А.:** Добрый день, уважаемый председатель диссертационного совета, уважаемые члены совета, уважаемые коллеги! Моя диссертация называется «Шариковый холодный замедлитель реактора ИБР-2: некоторые аспекты создания и применения». Перейду к актуальности работы.

До настоящего времени на реакторе ИБР-2 не было источника холодных нейтронов или холодного замедлителя, который бы длительное время, стабильно работал на физический эксперимент. Наличие такого холодного замедлителя и его комбинирование со стандартным тепловым замедлителем на основе воды, позволило бы проводить эксперименты на спектрометрах реактора с высокой интенсивностью, в широком диапазоне длин волн или параметров решетки.

При этом, наилучшим вариантом здесь является проект холодного замедлителя на основе твердых замороженных шариков из ароматического углеводорода – мезитилена. Мезитилен по совокупности своих положительных свойств является наиболее оптимальным вариантом для использования в качестве холодного замедлителя как на ИБР-2, таких и на других нейтронных источниках малой и средней интенсив-

ности, по сравнению со своими основными конкурентами: жидким водородом, твердым метаном, водой и некоторыми другими углеводородами. Кроме того, шариковая загрузка камеры замедлителя обладает рядом преимуществ по сравнению с использованием целого, например, замороженного куска. Во-первых, охлаждение камеры, в случае шариков, будет происходить быстрее, во-вторых, нет давления образующегося под облучением радиолитического водорода на стенки камеры во время отогрева, что может привести к ее разрушению, как, например, в случае твердометанового замедлителя. И наконец, это оперативная загрузка-выгрузка, практически неограниченный ресурс работы камеры замедлителя, а также возможность непрерывной смены материала замедлителя во время работы реактора на мощности.

Проект комплекса шариковых замедлителей предполагает создание трех замедлителей для всех экспериментальных пучков реактора. Целью диссертационной работы является разработка холодного шарикового 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.

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 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.

Кратко расскажу о положениях, выносимых 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.

Рассмотрим принцип работы шарикового холодного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2. Замедлитель 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.

Замедлитель состоит из первого и второго контуров охлаждения. Первый контур включает в себя камеру холодного замедлителя, пневмотранспортный трубопровод, датчики движения замороженных шариков в трубе РД и датчик расхода гелия G, соединенный с трубкой Пито, дозирующее устройство, газодувку и трубопровод отвода гелия от камеры замедлителя. Второй контур охлаждения состоит из криогенной гелиевой установки и трубопроводов подвода и отвода гелия к/от КГУ. После запол-

нения камеры замедлителя шариками запускают газодувку, и гелий начинает циркулировать в первом контуре охлаждения и через теплообменник. 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, охлажденному до температуры 80-85 К осуществляется доставка замороженных шариков из дозирующего устройства в камеру замедлителя, расположенную вблизи активной зоны реактора. Для заполнения камеры замедлителя необходимо загрузить 1 литр (~30000 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 окончания десятисуточного цикла работы реактора, расплавленный рабочий материал удаляется в специальную емкость для слива и утилизации, 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.

Зачем нам заниматься изучением пневмотранспорта твердых шариков? Во-первых, у нас отсутствует какая-либо информация о свойствах твердого аморфного мезитилена, а тем более о движении твердых замороженных шариков из мезитилена в трубопроводе сложной конфигурации при криогенной температуре. Во-вторых, нам необходимо определить скорость шарика в трубопроводе. С одной стороны она не должна быть слишком большой (более 4 м/с), иначе шарики будут разрушаться в процессе пневмотранспорта, а с другой – слишком малой, поскольку у нас есть временные ограничения на время загрузки камеры замедлителя. Кроме того, нам необходимо изучить характер движения шариков в трубопроводе, поскольку на него могут влиять различные факторы: шероховатость стенки, неидеальная форма самого шарика и т.д. И, наконец, необходимо подобрать геометрические размеры трубы и шариков для проектирования реальной пневмотрассы.

Рассмотрим движение шара в идеально гладкой круглой трубе. Под идеально гладкой трубой понимаем такую трубу, размер шероховатости стенки которой на 3-4

порядка меньше диаметра самого шарика. При первом рассмотрении мы считаем, что движение шара должно подчиняться тривиальным законам механики: шарик будет либо катиться, либо скользить, согласно стандартным уравнениям движения. Для расчета скорости движения шара нам необходимо определить зависимость коэффициентов аэродинамических сил и момента, действующих на шарик при обтекании его газом в трубе от скорости шарика –  $C_x$ ,  $C_y$  и  $C_m$ . Эти коэффициенты можно рассчитать из зависимостей от  $F_x$ ,  $F_y$  и  $M_z$  – это величины аэродинамических сил и момента, которые в свою очередь могут быть определены из расчета скорости обтекания шарика в трубе. Данные расчеты были проведены совместно с ЦАГИ. Результаты, например, для скорости газа 8 м/с приведены на рисунках. Темные символы – случай качения, светлые – скольжения. Полученные коэффициенты были использованы для расчета движения шара при его качении в трубе (скольжение далее не рассматривается). Результаты расчетов для скоростей газа 8 и 11 м/с представлены на рисунках. Видно, что конечная скорость шарика в идеальной гладкой трубе со временем выходит на конкретное установившееся значение.

Результаты расчетов необходимо было проверить экспериментально. Близость основных параметров – чисел Фрода и Рейнольдса позволяет нам вместо пневмотранспорта замороженных шариков из мезитилена холодным гелием при криогенной температуре, изучать пневмотранспорт обычных стеклянных шариков азотом комнатной температуры. Результаты для этих двух случаев будут практически одинаковыми.

Было проведено 2 типа экспериментов: в короткой стеклянной трубе и в длинном стальном трубопроводе – с геометрическими размерами, как у реальной пневмотрассы. Эксперимент тривиален: шарик через шлюз попадает в трубопровод, где потоком газа транспортируется в стеклянную трубу. Процесс движения снимается на видеокамеру, после чего вычисляется скорость и время движения, зависимость ускорения от скорости и т.д.

Результаты в виде зависимости ускорения от скорости шарика при скорости газа 6, 8 и 11 м/с представлены на рисунках. Кружки и квадраты – эксперимент, сплошная линия – расчет, прерывистая линия – аппроксимация эксперимента. Расчетные ускорения шарика, усредненные по многим пускам, согласуются с экспериментом только в узком диапазоне скорости шарика ~ 20-40% от скорости газа. При скорости

шарика  $\sim 40-50\%$  от скорости газа ускорение падает быстрее, чем предсказывает теория, и уже при скорости более  $50\%$  становится даже отрицательным. Разброс экспериментальных точек на рисунках связан не столько с погрешностью измерений, сколько с нерегулярностью движения шариков.

Практически во всем диапазоне скоростей движение шарика нерегулярно, подвержено то замедлению, то ускорению. Движение происходит в виде прыжков и отскоков по всей длине трубы из-за шероховатости стенки. В отличие от теории для идеально гладкой трубы, мы не получим установившегося значения конечной скорости, она будет случайно величиной, причем разброс будет достигать  $50-60\%$ . Несмотря на это, мы можем теоретически оценить ее максимальное и минимальное значения.

После прохождения неровности или назовем ее порогом, шарик будет терять продольную составляющую скорость и приобретать ортогональную так, как записано в данных соотношениях на слайде. Тогда при наличии регулярно расположенных порогов получим систему уравнений для определения минимального и максимального значений конечной скорости. Решение этой системы уравнений будет записано следующим образом. Тогда для параметров, характерных для пневмотранспорта стеклянных шариков потоком газообразного азота комнатной температуры, со скоростью, например,  $6\text{ м/с}$ , получим расчетное максимальное значение конечной скорости –  $3,1\text{ м/с}$ , а минимальное –  $1,97\text{ м/с}$ . Полученные теоретические оценки хорошо согласуются с результатами эксперимента в длинной стальной трубе, где для скорости газа  $6\text{ м/с}$  минимальное значение конечной скорости равно  $1,5\text{ м/с}$ , а максимальное –  $3,3\text{ м/с}$ .

По первой части работы мы можем сделать следующие выводы. Теоретические расчеты и эксперименты на лабораторной модели позволили нам предварительно определить некоторые параметры пневмотранспорта твердых шариков в трубопроводе: зависимость скорости от времени, ускорения от скорости, геометрические параметры трубы и т.д. Однако, одних теоретических и лабораторных исследований недостаточно, т.к. в реальном замедлителе мы имеем трубопровод сложной геометрии, и на данном этапе не получаем достаточно доказательств о работоспособности выбранного принципа загрузки камеры шариками. Поэтому, на следующем этапе необходимо проверить и доказать работоспособность выбранного принципа загрузки шариков в камеру холодного замедлителя при помощи полномасштабного испытательного стенда.

В основу создания стенда были положены представленные выше результаты теоретических и экспериментальных лабораторных исследований движения шара в круглой прямой трубе. Испытательный стенд представляет собой точную копию реального холодного замедлителя в масштабе 1:1 со всеми основными узлами и системами, принцип работы абсолютно одинаков. Единственным отличием является то, что камера-имитатор стенда, которая загружается замороженными шариками, не находится у реактора и шарики не подвергаются облучению. На стенде было проведено около 40 экспериментов, из которых было несколько полных загрузок камеры-имитатора холодного замедлителя стенда. Эксперименты на стенде позволили доказать работоспособность выбранного принципа загрузки камеры твердыми шариками и определить параметры оптимального режима его работы во время загрузки. Эксперименты на стенде позволили разработать и создать холодный замедлитель на реакторе ИБР-2 и ввести его в тестовую эксплуатацию на мощности реактора ИБР-2.

Всего в ходе тестовой эксплуатации до настоящего времени было проведено 15 циклов работы реактора. На данном слайде представлена программа управления и контроля холодного замедлителя в момент загрузки камеры в один из штатных циклов реактора ИБР-2. Информация из программы говорит нам о том, что загрузка происходит в штатном режиме без сбоев, параметры соответствуют параметрам оптимального режима загрузки камеры замедлителя.

В ходе тестовой эксплуатации замедлителя были получены следующие результаты. Они полностью совпадают с результатами для испытательного стенда. Отличительными являются следующие: это общее время работы на физический эксперимент – 2500 часов, что является очень хорошим показателем, на уровне ведущих мировых нейтронных источников, использующих холодные замедлители, минимальная температура камеры при работе реактора на мощности – 30 К. Важным параметром, полученным в ходе тестовой эксплуатации, является то, что максимальное время работы холодного замедлителя в рамках одного реакторного цикла ограничено 10,5 сутками. Это ограничение связано с критическим возрастанием вязкости после отогрева (сразу в 2 раза) после 10,5 суток работы замедлителя на мощности реактора. Это существенно увеличивает вероятность того, что мы при данной вязкости не сможем слить расплавленную облученную смесь, после отогрева, из камеры замедлителя, что может привести к выходу его из строя.



Успешная тестовая эксплуатация позволила продемонстрировать улучшения, которые дает шариковый холодный замедлитель при работе на спектрометрах РЕМУР и СКАТ ИБР-2.

Использование холодного замедлителя при работе на рефлектометре РЕМУР дает следующие улучшения: выигрыш в интенсивности по сравнению со стандартным водяным замедлителем составляет от 4 до 10 раз, а доступный диапазон длин волн увеличивается в 2 раза. Это дает для экспериментов по получению микропучка холодных нейтронов сокращение времени измерения в 10 раз, а для экспериментов по пространственному расщеплению пучка – до 20 раз. Здесь нужно отметить, что эксперимент по измерению спектров микропучка холодных нейтронов, был проведен впервые на реакторе ИБР-2, только благодаря шариковому холодному замедлителю нейтронов. Очевидно, что качество получаемых результатов и их статистика и точность на порядок выше, например, в экспериментах по пространственному расщеплению пучка, данные от холодного замедлителя показывают, что эффект расщепления пучка ярко выражен (мы четко видим расщепленный пучок с переворотом спина) в отличие от данных со стандартного теплового замедлителя.

Использование холодного замедлителя на СКАТе дает следующие улучшения: 1) интенсивность в случае холодного замедлителя выше в 4 раза, что сокращает время измерения спектров горных пород в 3-4 раза. При одном и том же времени измерения погрешности результатов от холодного замедлителя в 2 раза ниже; 2) спектр от холодного замедлителя в области длин волн более 4 ангстрем, четкий и не такой размытый, как спектр от теплового замедлителя, что позволяет, например, идентифицировать малые пики с очень небольшим содержанием фазы, например, так в ходе эксперимента был обнаружен пик кальцита, содержание которого в образце породы было всего 1,5%. Такую точность в этой области длин волн стандартный тепловой замедлитель нам никогда не давал. Здесь шариковый холодный замедлитель дал нам новую информацию, новые данные об объекте.

В заключении надо отметить, что:

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 16Å. Для спектрометра СКАТ выигрыш в интенсивности по сравнению с тепловым замедлителем доходит до 4 раз, при этом погрешность измерений снижается в 2 раза.

Спасибо за внимание!

**Оганесян Ю.Ц.:** Пожалуйста, вопросы.

**Гледенов Ю.М.:** Не могли бы Вы пояснить подробнее, что говорится в работе о расщеплении пучка, о том преимуществе в 2 раза?

**Булавин М.В.:** Эффект расщепления пучка растет линейно с ростом величины магнитного поля и квадратично с ростом длины волны нейтрона. Применение холодного замедлителя, который дает нам длинноволновые нейтроны, позволяет существенно увеличить эффект расщепления и измерять отраженный пучок без переворота спина и расщепленный с пучок с переворотом спина одновременно, без использования анализа поляризации, что экономит время измерения еще в 2 раза по сравнению с тепловым замедлителем, где эффект расщепления слабо выражен и пучки сливаются в один.

В принципе, для этих экспериментов увеличение эффекта расщепления можно добиться увеличением величины магнитного поля. Однако, если условия эксперимента требуют наличия малых магнитных полей, то такой эксперимент без использования

холодного замедлителя провести невозможно. Шариковый холодный замедлитель дает здесь существенное преимущество.

**Авдеев М.В.:** Вы показали рисунок зависимости вязкости от времени облучения. По какому критерию выбирается максимальное время работы замедлителя?

**Булавин М.В.:** На самом деле, кривая на графике идет плавно до дозы 140-145 МГр, это примерно 9,5 - 10 суток. До этой дозы увеличение вязкости идет медленно - в 1,2 раза, после этой дозы вязкость увеличивается сразу в 2 раза, что является тем самым критическим параметром, после которого существует довольно высокая вероятность выхода замедлителя из строя. На данный момент время работы замедлителя соответствует стандартному циклу работы реактора. Мы не знаем насколько сильно вязкость увеличится, если мы проработаем лишние 0,5 суток, может быть настолько, что мы просто не сможем слить облученную смесь из камеры, мы не знаем характер ее дальнейшего увеличения.

**Оганесян Ю.Ц.:** Скажите, пожалуйста, а откуда взялась эта идея загружать камеру шариками? И почему шариками, что по-другому нельзя?

**Булавин М.В.:** Идея с шариками появилась в 80-х гг. 20 века. Ее предложил профессор Бауэр. Это была идея проточного замедлителя. Преимущество именно шариков по сравнению, например, с твердым куском из метана, порошком или раствором заключается в следующем. Во-первых, охлаждение камеры будет происходить быстрее и до более низкой температуры, т.е. выход холодных нейтронов больше. Во-вторых, температура в разных точках замедлителя будет одинакова, что благотворно сказывается на спектре.

**Оганесян Ю.Ц.:** А размер шариков?

**Булавин М.В.:** 4,3 мм

**Оганесян Ю.Ц.:** Это что оптимальный размер? Почему такой размер? И как их делают, почему они иногда шероховатые, иногда нет?

**Булавин М.В.:** Да.  $4,3 \pm 0,3$  мм. Мы выбирали размер шариков в соответствии с диаметром трубы. Чтобы не было заторов в трубопроводе, диаметр трубы должен быть не менее, чем 4 диаметра шарика. Шарики больших размеров, более хрупкие, что критично для пневмотранспорта, шарики маленьких размеров будут хуже охлаждаться. Есть специальная капельница, которая позволяет изготавливать шарики различных размеров и очень гладкими, практически без шероховатости.

**Оганесян Ю.Ц.:** А что представляет собой транспортная труба? Там свободно в трубе? И как она заполняется шариками?

**Булавин М.В.:** Это труба в трубе с многослойной вакуумной изоляцией. Внутренняя транспортная труба имеет диаметр 16 мм. Шарик поступает в транспортную трубу со скоростью, примерно, 8 шт/с и двигаются друг за другом при массовом расходе гелия 1,5-2 г/с.

**Оганесян Ю.Ц.:** И эта система работает безотказно?

**Булавин М.В.:** Да, работает безотказно. С криогенной машины приходит холод и замедлитель работает безотказно. Даже во время цикла работы реактора за ним не надо следить. Дополнительные работы проводятся после окончания цикла работы замедлителя для слива облученной жидкости из камеры.

**Оганесян Ю.Ц.:** И, наконец, последний вопрос. Из чего сделаны шарик?

**Булавин М.В.:** Смесь 70% мезитилена и 30% метаксилола.

**Сидоркин С.Ф.:** Еще один вопрос. Вот Вы упомянули про идею создания шариковых замедлителей. Все-таки кто ее автор? Это Бауэр или кто-то другой?

**Булавин М.В.:** Это Бауэр, хотя, есть мнение, что эта идея была в ЛНФ еще до Бауэра.

**Оганесян Ю.Ц.:** Хорошо. Спасибо. Если больше нет вопросов, тогда секретарь огласит отзыв организации, в которой выполнялась работа и отзыв ведущей организации.

**Попеко А.Г.:** Имеется заключение Лаборатории нейтронной физики, в которой выполнялась данная работа. Оно положительное и замечаний не содержит. Есть отзыв ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», утвержденный заместителем директора по научной работе Э.Ф. Лобановичем. В целом оно положительное, однако, отмечается ряд недостатков. Заключение прилагается.

Указанные замечания не влияют на положительную оценку 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

**Оганесян Ю.Ц.:** Пожалуйста, вы готовы ответить на замечания?

**Булавин М.В.:** Да. По первому замечанию надо отметить, что спектр с теплового замедлителя измерялся меньше по времени, поэтому нейтронов в районе более 8 ангстрем мало. Так получилось, что не было достаточно времени на измерение спектра в больших длинах волн, поскольку основное внимание уделялось новому криогенному замедлителю. И, во-вторых, та область длин волн, для которой у нас проводились физические эксперименты, ограничивалась областью 8 ангстрем. Поэтому, получение информации о спектре с теплового замедлителя в области после 8 ангстрем, было не критичным, т.е. не было целей проводить эксперименты в этой области длин волн. Можно сказать, что это недоработка, здесь я согласен. Что касается выбора относительных единиц, то он был сделан так, чтобы смотреть уменьшение интенсивности нейтронов с увеличением длины волны относительно максимума спектра нейтронов от холодного замедлителя. При таком выборе, удобно смотреть выигрыш в интенсивности от холодного замедлителя.

Я согласен со вторым замечанием. В случае практически полностью некогерентного рассеяния нейтронов на ванадии интенсивность на спектрах лучше приводить в зависимости от длины волны, а не параметра решетки.

С третьим замечанием согласен.

**Оганесян Ю.Ц.:** Слово предоставляется научному руководителю

**Шабалин Е.П.:** Что можно сказать о вкладе диссертанта. О таком приборе, люди, работающие с холодными нейтронами мечтали еще с 80-х гг. Кроме жидкого водорода, тогда никаких замедлителей не было. И до сих пор в основном используют жидкий водород. Такой замедлитель имеет ряд недостатков. Один из них – это то, что в случае жидкого водорода у нас ограничен диапазон температур, только в районе от 20 до 30 К. Второй – это опасность использования. Жидководородный замедлитель не раз взрывался во время эксплуатации. Очевидно, что мезитиленовый замедлитель имеет неоспоримые преимущества. Максим в данном проекте проделал гигантскую работу, если бы не он то, возможно, проект не имел бы такого успеха, который он сейчас приобрел. Благодарю за внимание. Текст заключения прилагается.

**Оганесян Ю.Ц.:** Перейдем к отзыву официальных оппонентов. Сергей Валентинович Григорьев.

**Григорьев С.В.:** Оглашает отзыв. Текст прилагается. Замечаний нет.

**Оганесян Ю.Ц.:** Перейдем к следующему оппоненту. Станислав Федорович Сидоркин

**Сидоркин С.Ф.:** Оглашает отзыв. Текст прилагается. Есть следующие пожелания и рекомендации. В дальнейшем в работе желательно проанализировать возможность изготовления и загрузки в камеру замедлителя шариков из метана, который в настоящее время является лучшим, по выходу холодных нейтронов, материалом, используемым для холодных замедлителей, из всех известных в настоящее время материалов. И сравнить, насколько усложнилась работа с замедлителем из-за плохой радиационной стойкости метана. Также желательно в дальнейшем рассмотреть вопрос о возможности продления времени работы шарикового холодного замедлителя на основе мезитилена на физический эксперимент на спектрометрах ИБР-2. Это можно реализовать, например, путем разработки специального разгрузочного устройства, которое позволяло бы выгружать облученные шарики из мезитилена прямо во время работы реактора ИБР-2 на его номинальной мощности 2 МВт. Автору рекомендуется учесть данные замечания при его дальнейшей работе в рамках проекта по комплексу холодных замедлителей реактора ИБР-2 после защиты диссертации.

**Оганесян Ю.Ц.:** Спасибо большое. Пожалуйста, Максим Викторович, ответьте.

**Булавин М.В.:** Я согласен со всеми замечаниями и рекомендациями.

**Оганесян Ю.Ц.:** Так теперь у нас есть некоторое время для дискуссии. Пожалуйста, кто хочет высказаться.

**Аксенов В.Л.:** По существу содержательной части работы все было сказано. Могу подтвердить, что все вышесказанное соответствует действительности. Я хочу поздравить коллектив, который воспитал достойного ученика, поздравить Лабораторию нейтронной физики им. И.М. Франка и Объединенный институт ядерных исследований вот с этим достижением, которое здесь было представлено.

**Кухтин В.В.** Я хочу два слова сказать от имени участников эксперимента ATLAS. Мы работали по направлению использования жидкого аргона в калориметрии. И для того, чтобы быть уверенными в качестве работы этих калориметров в полях нейтронов, которые образуются во время протон-протонных взаимодействий. Мы работали на пучке №3 ИБР-2 в то время с Лушиковым В.И., Голиковым В.В. Это люди, которые нам помогали и работали с нами. Хочу сказать, что нынешнее поколение, которое пришло на смену этим большим ученым, в лице Максима Булавина, я бы сказал, ни-

чуть им не уступают, я говорю совершенно искренне. От лица всего нашего жидко-аргонного сообщества участвующего в ОИЯИ обращаюсь к членам диссертационного совета присвоить Булавину М.В. степень кандидата физ.-мат. наук.

**Оганесян Ю.Ц.:** Если больше нет желающих, то я хотел бы сказать следующее. Я хочу напомнить, что когда мы присуждаем степень кандидата физико-математических наук, прежде всего мы должны посмотреть насколько этот человек ориентируется в предмете своего исследования. Насколько он может сам сформулировать научную задачу, и самостоятельно ее решить. Вот эта самостоятельность в науке – это квалификация. Кандидатская диссертация является квалификационной диссертацией. Я думаю, то, что Вы слышали, как он отвечал на все вопросы, как он обходил трудные моменты, решение которых, в конце концов, было получено. Все это говорит о том, что это крепкий результат. Результат получен им самим. Поэтому, действительно, я думаю, мы можем присудить Булавину М.В. степень кандидата физико-математических наук. Есть еще вопросы или предложения? Если нет, тогда мы Вам предоставим заключительное слово.

**Булавин М.В.:** Я хотел бы в первую очередь поблагодарить своих коллег: Е.П. Шабалина, С.А. Куликова, Е.Н. Кулагина, К.А. Мухина и других. Без этих людей у нас и у меня лично ничего бы не получилось. Огромная благодарность и низкий поклон, естественно, и всей Лаборатории нейтронной физики, за то, что научили и помогли, а я в свою очередь уже помог Лаборатории завершить проект.

**Оганесян Ю.Ц.:** Хорошо. Есть предложение попросить Дмитриева С.Н., Утенкова В.К. и Скуратова В.А. взять на себя труд по проведению голосования. Пожалуйста.

**ПОСТАНОВИЛИ:** Избрать счетную комиссию в составе: Дмитриев С.Н., Утенков В.К. и Скуратов В.А.

**СЛУШАЛИ:** Утверждение протокола счетной комиссии по проведению тайного голосования о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Булавину М.В.: состав совета утвержден в количестве 25 человек, присутствовали на заседании 18 членов совета, из них по профилю рассматриваемой диссертации – 6 докторов наук, роздано бюллетеней - 18, оказалось в урне для голосования – 18, при этом с отметкой "за" - 18, подано с отметкой "против" - нет, недействительных бюллетеней - нет.

**Оганесян Ю.Ц.:** Прошу утвердить протокол счетной комиссии. Протокол счетной комиссии утвержден единогласно. На основании изложенного диссертационный совет Д 720.001.06 в Объединенном институте ядерных исследований принял решение о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Булавину М.В. Переходим к обсуждению заключения совета по диссертации Булавина М.В. Проект заключения есть у всех членов совета.

**Оганесян Ю.Ц.:** Есть у кого-либо замечания.

**Дмитриев С.Н.:** Есть. Последнее предложение надо переделать.

**Оганесян Ю.Ц.:** Еще замечания есть?

**Шабалин Е.П.:** У меня есть. Я предлагаю в первом пункте убрать первые два слова «выведены уравнения». Дело в том, что это снижает достоинство диссертации.

**Оганесян Ю.Ц.:** Еще замечания есть? Все «за». Против - нет. Единогласно утверждено с учетом принятых замечаний.

Председатель диссертационного совета,  
академик РАН

Оганесян Ю.Ц.

Ученый секретарь  
диссертационного совет



Попеко А.Г.