

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Куликова Сергея Александровича
на тему: Холодные замедлители нейтронов на основе твердых дисперсных
водородсодержащих материалов
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Актуальность темы. Нет необходимости доказывать, что в настоящее время холодные нейтроны становятся все более востребованными при изучении методом рассеяния нейтронов таких структур, как полимеры, белки, наночастицы, новые магнитные материалы, при проведении экспериментов по нейтронографии в реальном времени, например, для изучения химических реакций в твердой фазе, и т.д. Ввиду малого потока холодных нейтронов в термализованном энергетическом спектре, охлаждение замедляющего вещества, холодного замедлителя, является наиболее эффективным способом повышения интенсивности их выхода, тем самым открывая возможность более детального изучения свойств веществ и материалов.

Как справедливо указывает автор диссертации, в России сейчас 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 углеводов, 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, 1- во Франции, 3 – в Англии, 2 – в Японии, 1- в Австралии, 2- в Германии, 1 - в Венгрии. С завершением создания на ИЯУ ИБР-2 комплекса замедлителей широкого спектра, которые диссертант называет «комбинированными» и в которых будет три холодных замедлителя, аналогичных обсуждаемому, вкупе с пуском стационарного реактора ПИК Россия получит современный парк спектрометров для изучения свойств современных материалов с высокой производительностью и точностью.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Автором разработано новое направление в физике и технике холодных замедлителей нейтронов. Суть его заключается в создании замедлителей на основе твердых дисперсных водородсодержащих

материалов, а именно: замороженной смеси ароматических углеводородов (мезитилена и м-ксилола). В процессе разработки этого направления диссертант решал последовательно и обоснованно следующие задачи: изучение радиационных эффектов в водородсодержащих веществах и материалах, потенциально эффективных для холодных замедлителей; проводил расчетные исследования по оптимизации структуры и размеров холодных замедлителей, показав преимущества замедлителя на основе ароматических углеводородов перед твердым метаном, считавшимся наиболее эффективным замедлителем; затем – разработка концепции комбинированных замедлителей для реактора ИБР-2 (холодные в комплексе с водяными замедлителями комнатной температуры); изучение и моделирование технических процедур по загрузке и выгрузке твердых шариков замороженной смеси, и, наконец - изучение свойств холодного замедлителя на реакторе ИБР-2 и экспериментальное доказательство его высокой эффективности – поток холодных нейтронов более, чем на порядок выше потока из водяного замедлителя. Тем самым обоснованно продемонстрировав преимущества таких замедлителей перед традиционными в величине плотности потока холодных нейтронов в широком диапазоне рабочих температур – от 20 К до 100 К. Экспериментально впервые доказано отсутствие явлений спонтанной реакции рекомбинации радикалов в смеси мезитилена и м-ксилола. Разработанный способ дисперсной загрузки смеси мезитилена и м-ксилола в камеру холодного замедлителя в виде мелких шариков при низких температурах потоком холодного газообразного гелия, которым и охлаждается вещество замедлителя, бесспорно является удачным и эффективным решением проблемы конструирования замедлителей для высокоинтенсивных источников. Эффективность впервые созданного холодного замедлителя на основе дисперсной не взрывоопасной смеси мезитилена и м-ксилола несомненна:

- поток холодных нейтронов возрастает до 13 раз;
- исследовательская ядерная установка (ИЯУ) ИБР-2 при мощности 2 МВт может работать непрерывно без замены материала замедлителя до 10 суток.

Путем численного моделирования показана возможность получения широкого энергетического спектра (с холодной и теплой частями) нейтронов, а позднее на этой основе создан комбинированный замедлитель нейтронов. Применение

комбинированного замедлителя расширило возможности для проведения экспериментов на шести из четырнадцати спектрометров ИЯУ ИБР-2.

Достоверность и новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Исследования радиационных эффектов в водородосодержащих веществах при низких температурах, проведенные с участием автора в первом десятилетии 21-го века, являются наиболее полными и представительными. В настоящее время эти результаты используют ученые и инженеры, работающие с водородсодержащими веществами при низких температурах на реакторах и ускорителях во всем мире, в частности, результаты диссертации нашли свое применение при создании холодного замедлителя нейтронов на второй мишени источника ISIS (RAL, Великобритания). Особенно следует отметить обнаруженные в этих исследованиях сложные и неожиданные радиационно-стимулированные явления во льду обычной воды. Использование твердой смеси ароматических углеводородов в виде гранулированных частиц (мелких шариков) для получения нейтронов низкой энергии на интенсивных источниках является новаторской идеей, с экспериментально доказанным преимуществом перед другими способами термализации нейтронов: жидким водородом, льдом воды и твердым метаном. Автором показана практическая надежность такого способа получения холодных нейтронов, высокая реальная (подчеркиваю – реальная, т.е. практически достижимая, а не теоретическая, к которой часто апеллируют) эффективность, выше, чем, при использовании твердого метана; взрыво- и пожаробезопасность, возможность работы в широком диапазоне температур. Всё это подтверждено созданием и пуском первого в мире холодного замедлителя с твердым замедляющим веществом в дисперсном виде на ИЯУ ИБР-2.

Ранее были только попытки применения мезитилена на источниках малой мощности. Ещё раз подчеркивая пионерскую роль исследований, освещенных в диссертации, можно отметить:

- Впервые экспериментально исследован весь набор водородсодержащих материалов, перспективных для использования в холодных замедлителях нейтронов при низких (20 - 30 К) температурах, на радиационную стойкость и другие радиационные эффекты.

- Впервые использована не взрывоопасная смесь ароматических углеводородов в качестве замедляющего материала для холодного замедлителя нейтронов, позволяющая работать в широком диапазоне температур от 30 до 150 К.
- Впервые разработан и создан холодный замедлитель с дисперсным способом загрузки камеры холодного замедлителя. Замедлитель способен непрерывно работать до 10 суток и обеспечивать плотность потока холодных нейтронов с длиной волны более 4 ангстрем до 10^{12} н/см²/сек, что дает увеличение потока холодных нейтронов с длинами волн более 7 ангстрем в 13 раз по сравнению с плоским водяным замедлителем комнатной температуры.
- Впервые разработан и создан комбинированный замедлитель нейтронов для исследовательской ядерной установки. Его применение дает более гибкий подход к использованию нейтронов. Он позволяет получить необходимый спектр нейтронов на выведенных пучках (тепловых, холодных или смешанных) для новых и модернизируемых спектрометров в зависимости от требований экспериментаторов. Создание комбинированного замедлителя с холодным замедлителем в его составе в ЛНФ ОИЯИ выводит ИЯУ ИБР-2 по своим характеристикам в число лидирующих источников мира, предназначенных для нейтронных исследований конденсированных сред на выведенных пучках.

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. Автор вписал свою главу в эту историю. Можно уверенно заявить, что отныне наиболее эффективным источником холодных нейтронов на ядерных установках средней интенсивности (до 1-2МВт) 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

будут использованы при создании следующих двух холодных замедлителей ИЯУ ИБР-2.

В целом содержание диссертации соответствует заявленным целям и выводам; оформление соответствует требованиям ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Хотя в целом работа написана хорошим русским языком и прекрасно структурирована, она не лишена и некоторых огрехов. К техническим недостаткам оформления следует отнести некоторое, впрочем, небольшое, количество орфографических и стилистических ошибок и опечаток.

1) Так на стр. 63 указано, что «величина насыщения энергии .. зависит от температуры облучения и стремится к нулю при T облуч ~ 29 К», в то время как на Рис.35 видно, что она равна 30 Дж/г при $T = 29$ К. Что же все-таки имеется ввиду?

2) На стр. 69 впервые показано, что «под действием излучения наблюдалось ухудшение теплопроводности льда» в 10 раз, однако не обсуждается причина этого явления. Что это могло бы быть: аморфизация? Какова суть явления?

3) В подписи к рис.71, стр.119, есть вводящее в заблуждение пояснение, что представлены спектры «...с учетом радиационных повреждений». На самом деле, текст раздела поясняет, в чем дело, но присутствует некоторая непродуманность формулировки.

4) На стр.85 показано, что скорость выхода водорода имеет пик при $T = 69$ К и экспоненциальный скачок при $T = 78$ К (Рис.50). Автор не указал, в чем причина этих явлений? Плавление метана ожидается при $T > 90$ К: почему водород выходит при температурах явно ниже температуры плавления?

5) К общим замечаниям следует отнести следующие: Титул главы 4 не совсем соответствует содержанию главы: заявленная в титуле «концепция комбинированного замедлителя» уже изложена ранее в главе 3. Следовало озаглавить главу 4, например, «Комплекс комбинированных замедлителей на реакторе ИБР-2 для пучков 7, 8, 10, 11: конструктивные особенности, исследование свойств».

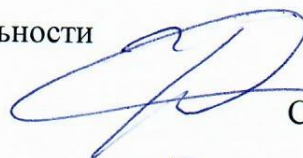
6) Не указана температура плавления шариков смеси мезитилена и м-ксилола. Не указано, как эта температура меняется с ростом вязкости смеси после облучения.

7) В работе не обсуждается вопрос насколько плотно упаковываются шарики смеси мезитилена и м-ксилола при их попадании в холодный замедлитель. Ясно, что, чем плотнее упаковка, тем эффективнее работает замедлитель. Плотность упаковки можно оценить по объему жидкости после того, как шарики растаяли. Однако таких оценок не приводится.

Впрочем, отмеченные недостатки работы не влияют на высокую положительную оценку диссертации в целом, а также на справедливость положений и выводов.

Таким образом, диссертация Куликова Сергея Александровича на соискание ученой степени доктора наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно-обоснованные физические и технологические решения проблемы создания эффективных холодных замедлителей нейтронов, внедрение которых вносит значительный вклад в научную базу исследовательских центров страны, что соответствует критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктор физико-математических наук.

Зам. директора по международной деятельности
НИЦ «Курчатовский институт» ПИЯФ,
доктор физико-математических наук,



С.В. Григорьев

« 5 » декабря 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
ФГБУ "Петербургский институт ядерной физики им.Б.П. Константинова"
НИЦ "Курчатовский институт"
кандидат физ.-мат. наук



С.И. Воробьев