

УДК 54.062:54.084:543.544.33:544.541

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАРИКОВОГО КРИОГЕННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕЗИТИЛЕНА НА ИМПУЛЬСНОМ БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ ИБР-2

© 2022 г. М. В. Булавин^{a, b}, К. А. Мухин^{a, b}, А. Ыскаков^{a, c, *}, А. Д. Рогов^a,
А. В. Галушко^a, В. А. Скуратов^a, И. А. Смелянский^a

^aОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

^bПетербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Гатчина, 188300 Россия

^cИнститут ядерной физики, Алматы, 050032 Казахстан

*e-mail: yskakov@jinr.ru

Поступила в редакцию 18.04.2021 г.

После доработки 22.06.2021 г.

Принята к публикации 30.06.2021 г.

Представлены радиохимические и нейтронно-физические характеристики шарикового криогенного замедлителя на основе смеси мезитилена (смесь в виде замороженных шариков), полученные во время его эксплуатации на импульсном быстром реакторе ИБР-2. Показано, что изменение свойств смеси при высоких поглощенных дозах облучения (~100 МГр) не оказывает существенного влияния на спектр холодных нейтронов. Выигрыш в количестве холодных нейтронов с поверхности холодного замедлителя по сравнению с водяным замедлителем доходит до 10 раз. Деградация нейтронного потока в конце рабочего цикла реактора не наблюдается. В случае успешного развития технологии непрерывной смены рабочего вещества в камере криогенного замедлителя замороженную смесь мезитилена и метаксилола можно рекомендовать к использованию на мощных импульсных источниках нейтронов.

Ключевые слова: криогенный замедлитель, ароматические углеводороды, мезитилен, метаксилон, поглощенная доза, радиолитический водород, вязкость, спектр нейтронов, импульсный источник нейтронов.

DOI: 10.31857/S1028096022010034

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время фокус исследований в физике конденсированного состояния вещества методами рассеяния нейтронов все больше смещается в сторону изучения длиннопериодных структур, т.е. структур с межатомным расстоянием более 4 Å. Для реализации таких исследований необходимо создавать источники нейтронов с соответствующей длиной волны, или, другими словами, источники холодных нейтронов, или холодные (криогенные) замедлители. В настоящее время на реакторе ИБР-2 в Дубне создан стабильно работающий комплекс из двух криогенных замедлителей на основе твердого дисперсного мезитилена, который генерирует высокоинтенсивные пучки холодных нейтронов для проведения физических исследований на спектрометрах в широком диапазоне длин волн [1–12].

Надо отметить, что в настоящее время единственный в России действующий источник холодных нейтронов – это комплекс криогенных замедлителей на основе мезитилена и метаксило-

ла, в то время как в мире работают более 15: четыре – в США, три – во Франции, три – в Англии, два – в Японии, один – в Австралии, два – в Германии, один – в Венгрии, один – в Швейцарии. Поэтому развитие комплекса мезитиленовых замедлителей на реакторе ИБР-2 совместно с пуском стационарного реактора ПИК в Гатчине и модернизацией реактора ИР-8 в Москве (НИЦ “Курчатовский институт”) позволит в самое ближайшее время создать в России современный парк спектрометров для изучения свойств современных материалов с высокой производительностью и точностью.

Уже сейчас уникальный опыт разработки дисперсных (шариковых) замедлителей реактора ИБР-2 необходимо использовать для создания подобного комплекса как на компактных источниках нейтронов, так и на новых, более мощных, импульсных реакторах [13–16]. Эти разработки критически важны, поскольку на использование в импульсных реакторах жидкого водорода и тяжелой воды – традиционных замедлителей на

мощных стационарных нейтронных источниках — из-за взрывоопасности накладывается серьезное ограничение. Известны два случая взрыва замедлителя на жидком водороде на стационарных реакторах [17]. В обоих случаях не было серьезных последствий, так как реакторы стационарного действия в 40 раз менее чувствительны к изменению их геометрии, чем импульсные реакторы. Аналогичная ситуация на импульсном быстром реакторе (ИБР-2) привела бы к серьезной ядерной аварии [18].

В настоящей работе авторы, опираясь на многолетний опыт успешной работы шариковых холодных замедлителей на основе ароматического углеводорода — мезитилена — на импульсном реакторе ИБР-2 [1–12], приводят основные результаты, полученные во время эксплуатации в условиях реального реакторного эксперимента.

ХОЛОДНЫЕ ЗАМЕДЛИТЕЛИ НА НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКАХ: ПРЕИМУЩЕСТВА МЕЗИТИЛЕНА

Учитывая многолетний опыт эксплуатации холодных замедлителей на нейтронных источниках разной интенсивности во всем мире [17–30], можно выделить следующие материалы, используемые в качестве рабочего вещества для замедления нейтронов: водород в жидкой фазе (также в смеси с дейтерием или чистый дейтерий), метан в жидкой и твердой фазе, мезитилен в твердой фазе.

Наиболее технологичный и чаще всего применяемый сегодня материал для холодных замедлителей — это жидкий водород [17]. Технологию его использования десятилетиями отработывали на самых мощных нейтронных источниках по всему миру. Основное преимущество жидкого водорода по сравнению с метаном и мезитиленом — отсутствие радиолиза и радиационных эффектов, что не накладывает никаких ограничений на его использование на самых мощных нейтронных источниках с огромной величиной поглощенной дозы. Но есть и минусы. Во-первых, термализация нейтронов в жидком водороде происходит не полностью, что приводит к снижению плотности потока холодных нейтронов и увеличению времени экспозиции образца. Неполная термализация нейтронов в жидком водороде — следствие отсутствия низколежащих вращательных уровней возбуждения молекулы и малой плотности ядер. Во-вторых, как уже говорилось выше, высокая вероятность взрыва водорода ограничивает возможность его применения на импульсных реакторах (ИБР-2, ISIS, ИБР “Нептун”), которые в десятки раз более чувствительны к изменению геометрии (которое может произойти из-за взрыва водорода) по сравнению со стационарными реакторами. В-третьих, требования безопасности приводят к необходимости увеличения стенки камеры с во-

дорудом, что еще больше снижает интенсивность выхода холодных нейтронов с поверхности такого холодного замедлителя и сводят на нет всю производительность любого, самого мощного ИБР. В-четвертых, использование жидкого водорода ограничено температурой 20 К, в то время как большое количество современных научных установок — комплексов спектрометров — оптимально работают в широком интервале температур 20–100 К.

Конечно, несмотря на все эти проблемы, не стоит совсем отказываться от идеи использования жидководородного замедлителя на ИБР, хотя бы по причине его высокой радиационной стойкости, но в то же время необходимо уделить особое внимание альтернативе — ароматическим углеводородам и метану, а в первую очередь, мезитилену и его смесям.

Мезитилен обладает высокой радиационной стойкостью по сравнению с метаном или льдом [31–36]. Выход водорода из мезитилена в результате взаимодействия с потоком нейтронов в 10 раз меньше, чем из метана, а из его смеси с толуолом или метаксилолом — даже в 20 раз. В отличие от метана и льда в мезитилене практически не происходит накопление радикалов, поэтому и не наблюдаются “спонтанные” всплески температуры (реакции рекомбинации радикалов), как в метане или во льду [37–43]. Анализ литературных данных [35, 36] и опытная эксплуатация комплекса замедлителей на основе твердых шариков из мезитилена на реакторе ИБР-2 [1–12, 31] не выявили радиационную полимеризацию мезитилена под действием облучения, что, несомненно, многократно повышает ресурс работы камеры замедлителя.

Наличие низких энергетических уровней молекул в мезитилене способствует быстрой термализации нейтронов. Молекула мезитилена имеет в своем составе три комплекса CH_3 , которые совершают слегка заторможенное вращение вокруг оси симметрии комплекса. Энергия таких вращений для твердого мезитилена равна 7 мэВ, а для его смесей с различными производными бензола, для которых характерна структура “протонного стекла” [44–47], — 5 мэВ. Измерения спектров холодных нейтронов и экспериментальные данные о сечениях неупругого рассеяния указывают на то, что по выходу холодных нейтронов мезитилен проигрывает твердому метану, однако он лучше, чем жидкий водород, и значительно лучше льда [28].

В отличие от метана мезитилен можно использовать в более широком интервале температур. В состоянии твердой фазы мезитилен находится уже при температуре ниже 228 К, а в состоянии жидкой фазы — в интервале от 228 до 392 К. Таким образом, загрузку мезитилена в камеру замедлителя можно производить как при комнат-

ной температуре, так и при температуре жидкого азота, а ее изменение в процессе проведения физического эксперимента позволяет менять спектр нейтронов в соответствии с требованием экспериментатора.

Что касается безопасности использования мезитилена на источнике нейтронов (в особенности на импульсном), то он не взрывоопасен и не так легко воспламеняем, как метан или водород. Мезитиленовый замедлитель представляет собой хороший компромисс между физическими (выход холодных нейтронов) и технологическими свойствами (радиационная стойкость, удобство в работе, безопасность). Способ загрузки камеры замедлителя твердыми замороженными шариками мезитилена позволяет легко снимать энерговыделение при замедлении быстрых нейтронов, а также оперативно осуществлять загрузку и выгрузку вещества замедлителя, что делает ресурс его работы практически неограниченным. Важно и то, что сферическая форма замедлителя в отличие от цельного замороженного куска материала позволяет образуемому в результате облучения радиолитическому водороду беспрепятственно покидать камеру замедлителя, не создавая в ней избыточного давления.

Все вышесказанное подтверждает многолетняя (с 2012 г.) успешная безаварийная эксплуатация мезитиленового замедлителя для проведения физических экспериментов на реакторе ИБР-2.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КРИОГЕННОГО ШАРИКОВОГО МЕЗИТИЛЕНОВОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НА НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА ИБР-2

В настоящее время комплекс шариковых криогенных замедлителей нейтронов реактора ИБР-2 на основе смеси ароматических углеводородов мезитилена и метаксилола (далее рабочей смеси) работает для проведения физического эксперимента на номинальной мощности реактора. Комплекс состоит из трех замедлителей, имеющих проектные номера 201, 202 и 203 (рис. 1). КЗ201 “производит” холодные нейтроны в направлении нейтронных пучков № 1, 4–6 и 9 (спектрометры КОЛХИДА, ЮМО, ФДВР, ДН-6, РЕФЛЕКС), КЗ202 – в направлении пучков № 7, 8, 10 и 11 (спектрометры СКАТ, НЕРА, ЭПСИЛОН, РЕМУР, ГРЭЙНС и ФСД), а КЗ203, находящийся в настоящий момент в стадии принятия решения о реализации проекта, будет работать в направлении нейтронных пучков № 2 и 3.

Из-за различного расположения КЗ201 и КЗ202 относительно активной зоны ИБР-2 дозовая нагрузка в камерах замедлителей распределяется по-разному. Максимальная расчетная мощ-

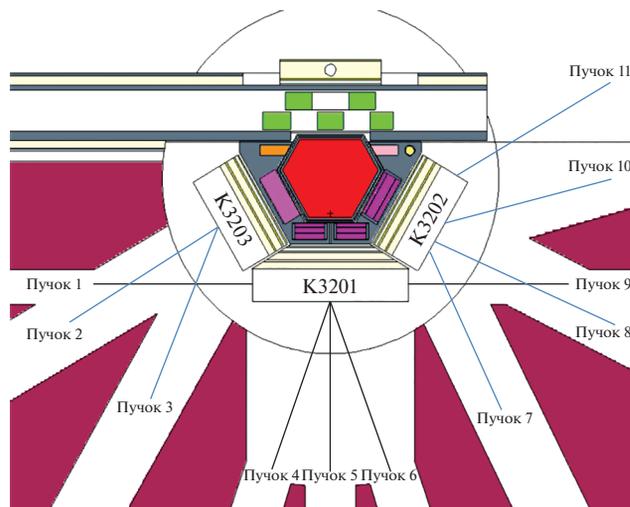


Рис. 1. Комплекс шариковых криогенных замедлителей реактора ИБР-2.

ность дозы нейтронов и гамма-квантов оказывается в камере замедлителя КЗ201 и достигает 49.6 и 16.4 Гр/с соответственно (1 МВт мощности реактора ИБР-2 соответствует потоку нейтронов 0.93×10^{17} н/с). Нетрудно установить, что за один стандартный цикл работы реактора в режиме криогенного замедлителя (без смены мезитилена в камере), который равен 11 суткам, максимальная суммарная поглощенная доза в смеси будет ~100 МГр.

Подобные экстремальные условия работы в полях высокого ионизирующего излучения неизбежно приводят к изменению состава рабочей смеси. Изменение состава под действием облучения приводит к образованию радиолитического водорода и повышению вязкости рабочей смеси после облучения, а также может приводить к деградации нейтронного потока, что обязательно должно отразиться на нейтронных спектрах. Важно проанализировать эти факторы, для того чтобы дать им адекватную оценку и прогнозировать их влияние на работоспособность мезитиленового замедлителя при экстремальных дозовых нагрузках.

Анализ состава рабочей смеси до и после облучения приведен в табл. 1, в которой указаны вещества с наибольшей массовой концентрацией. Образец чистой смеси был проанализирован по ГОСТ 32507-2013 (метод Б) при 35°C (детальный углеводородный анализ бензина). Образец облученной смеси был проанализирован по ГОСТ 32507-2013 (метод Б) при 35°C, но с увеличением температуры испарителя до 330°C, а также по ГОСТ EN 12916 “Нефтепродукты. Определение типов ароматических углеводородов в средних дистиллятах. Метод высокоэффективной жидкостной хроматографии с детектирова-

Таблица 1. Состав смеси мезитилена и метаксилола до и после облучения дозой 100 МГр

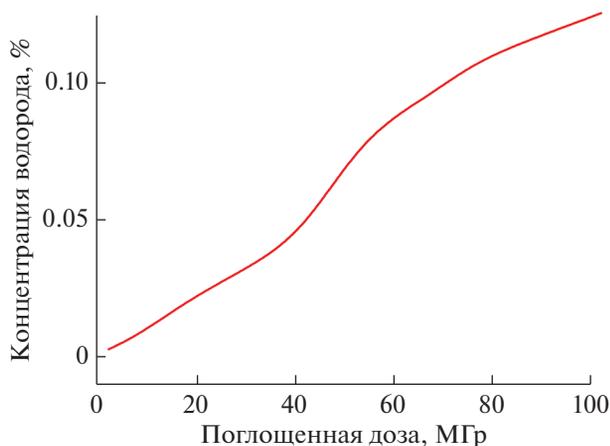
	Концентрация до облучения, мас. %	Концентрация после облучения, мас. %
Мезитилен (1,3,5-триметилбензол)	82.6	0
Метаксилон (1,3-диметилбензол)	16.7	0
Псевдокумол (1,2,4-триметилбензол)	0.45	35
3-Этилтолуол (1-метил-3-этилбензол)	0.25	0
Параксилон (1,4-диметилбензол)	0	15
Прочие, в том числе неидентифицированные химические вещества	0	50

нием по коэффициенту рефракции”. Компоненты идентифицировали с помощью масс-спектрометрического детектора.

Для всех компонентов после облучения характерны массы 194, 178, 133, 118, 105, которые говорят о наличии трех, двух и одного бензольного кольца. Полимеризации и образования большого количества тяжелых радикалов в смеси не наблюдается.

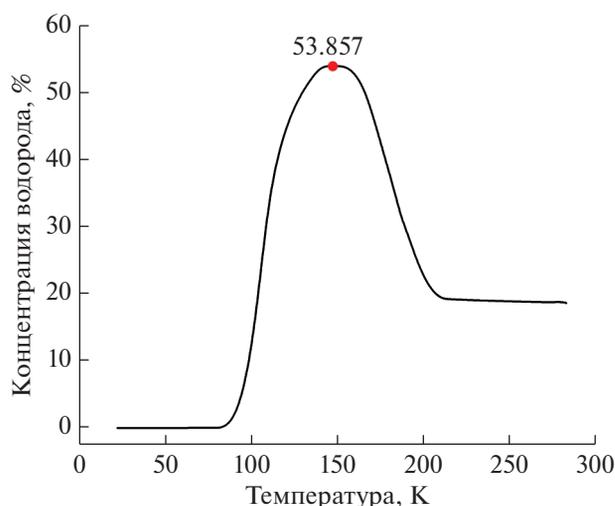
Радиолитический водород, который образуется под действием облучения, а также увеличение вязкости смеси являются результатом радиохимических превращений в мезитиле [46–48]. Экспериментально установлено, что во время работы камеры криогенного замедлителя при температуре ~25 К в течение одного стандартного цикла в подобных экстремальных условиях взрывоопасный радиолитический водород практически не образуется на протяжении всего цикла [29] (рис. 2).

Выход водорода начинается вовремя пострадиационного отогрева смеси в конце цикла (мощность ИБР-2 равна 0 МВт) при температуре ~90 К,

**Рис. 2.** Зависимость концентрации радиолитического водорода от поглощенной дозы при температуре рабочей смеси ~25 К.

а максимальная концентрация доходит до ~54% (рис. 3). Падение концентрации после 150 К на графике обусловлено принципом работы газового хроматографа, в котором осуществляется непрерывный расход исследуемого газа (в данном случае смеси гелия с водородом) через термохимический детектор. Несмотря на относительно высокую концентрацию водорода в инертном гелии, условия для образования взрывоопасной смеси в каких-либо системах криогенного замедлителя отсутствуют [31].

Вязкость облученной жидкости измеряли по ГОСТ 25 271-93 “Пластмассы. Смолы жидкие, эмульсии или дисперсии. Определение кажущейся вязкости по Брукфильду”. Вязкость рабочей смеси до облучения оказалось равной ~1 мПа · с, а после облучения – 54 мПа · с. Полученное значение вязкости смеси допустимо, жидкость свободно и в полном объеме (около 650 мл) сливается из камеры замедлителя, полимеризация мезитилена не происходит. В настоящее время до

**Рис. 3.** Зависимость концентрации радиолитического водорода от температуры во время пострадиационного отогрева облученной рабочей смеси. Время отогрева около 17 ч.

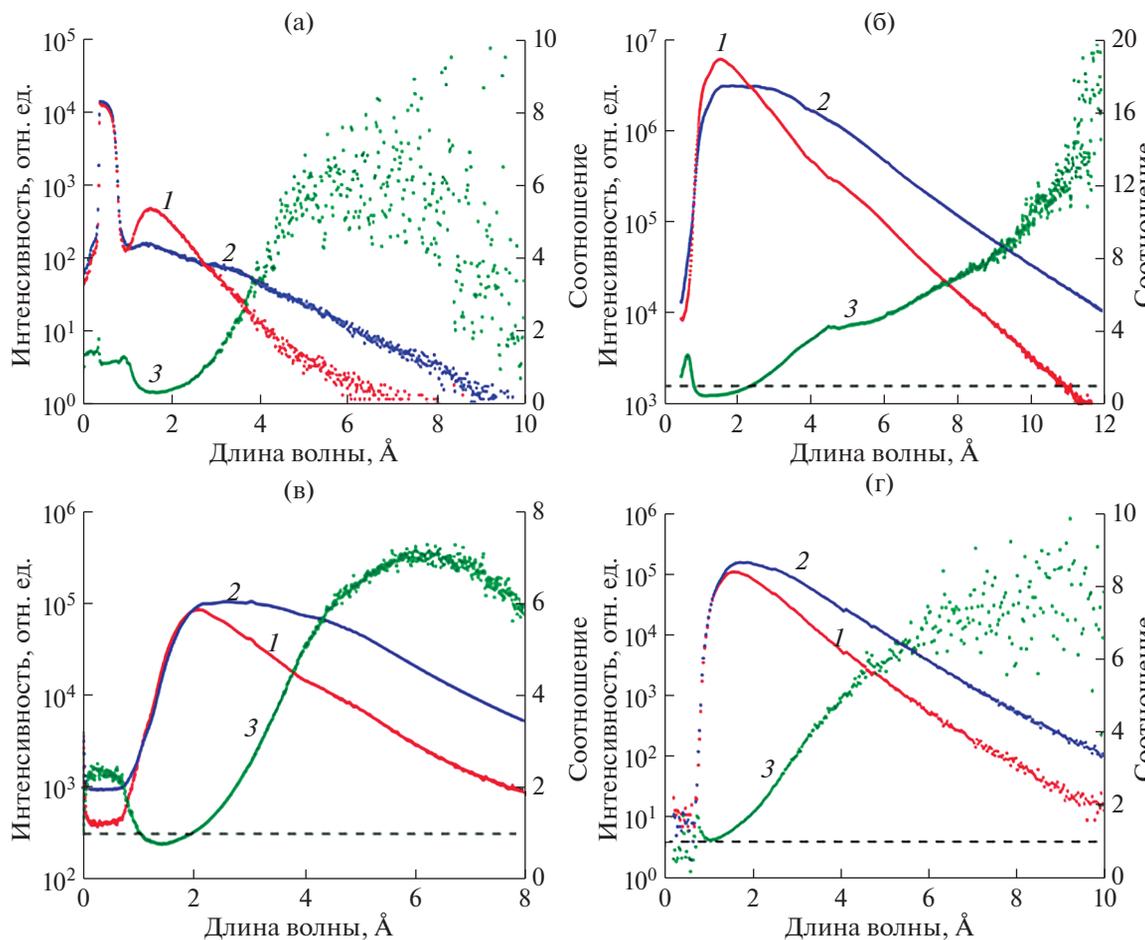


Рис. 4. Спектры нейтронов для спектрометров 4 (а), 5 (б), 6 (в), 9 (г) в направлении криогенного замедлителя К3201: 1 – теплые нейтроны; 2 – холодные нейтроны; 3 – выигрыш в интенсивности холодных нейтронов с поверхности криогенного замедлителя по сравнению с водяным.

конца не установлено, при каком значении поглощенной дозы вязкость смеси начинает резко возрастать, поскольку постановка такого эксперимента в реальности является довольно сложной и дорогостоящей задачей.

Полученные экспериментальные данные об образовании радиолитического водорода и увеличении вязкости позволяют сделать вывод о том, что мезитиленовый замедлитель может стабильно и безопасно работать при $T = 25$ К и поглощенной дозе 100 МГр. Ресурс работы камеры замедлителя с периодической сменой облученного мезитилена в ней в данном случае практически неограничен.

Важным является и тот факт, что первые данные, полученные в 2020–2021 гг. для научных установок в направлении криогенного замедлителя К3201 (рис. 4), показывают убедительный выигрыш в плотности потока холодных нейтронов (до 10 раз) с поверхности криогенного замедлителя по сравнению с водяным замедлителем на протяжении всего реакторного цикла. Дegrada-

ция плотности нейтронного потока, несмотря на высокую поглощенную дозу в мезитилена (и, как следствие, изменение состава смеси на основе мезитилена), в камере К3201 не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание криогенных замедлителей на импульсных быстрых реакторах, как ИБР-2, так и следующего поколения (ИБР-3), требуют особого подхода к обеспечению безопасности во время эксплуатации. Многолетний опыт использования мезитилена в виде замороженных шариков в качестве криогенного замедлителя реактора ИБР-2 говорит о том, что этот безопасный материал с высоким выходом холодных нейтронов является прекрасной альтернативой жидкому водороду на импульсных источниках малой (компактных источниках) и средней интенсивности. Развитие технологии непрерывной смены твердого дисперсного мезитилена в камере криогенного замедлителя позволит использовать его и на более

мощных, чем ИБР-2, импульсных нейтронных источниках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 19-12-00363).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьев В.Д., Беляков А.А., Богдзель А.А. и др.* Первый в мире шариковый холодный замедлитель нейтронов. Сообщение ОИЯИ Р13-2012-113. Дубна, 2012. 14 с.
2. *Shabalin E., Kulikov S., Bulavin M. et al.* // Neutron News. 2013. V. 24. № 3. P. 27.
3. *Ananiev V., Belyakov A., Bulavin M. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2014. V. 320. P. 70.
4. Патент 2492538 (РФ). Шариковый холодный замедлитель нейтронов / ОИЯИ. *Ананьев В.Д., Беляков А.А., Булавин М.В., Верхоглядов А.Е.* // БИПМ. 2013. № 35. С. 2.
5. *Булавин М.В., Ананьев В.Д., Беляков А.А., Верхоглядов А.Е., Куликов С.А., Мухин К.А., Шабалин Е.П.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 2. С. 131.
6. *Ananiev V., Belyakov A., Bulavin M.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. № 746. P. 012031.
7. *Булавин М.В., Кожевников С.В., Жакетов В.Д., Петренко А.В., Верхоглядов А.Е., Куликов С.А., Шабалин Е.П.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 1. С. 5.
8. *Булавин М.В., Васин Р.Н., Куликов С.А., Локаичек Т., Левин Д.М.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016. № 5. С. 1.
9. *Булавин М.В.* Шариковый холодный замедлитель реактора ИБР-2: некоторые аспекты создания и применения: Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Дубна: ОИЯИ, 2017. 149 с.
10. *Мухин К.А.* Источник холодных нейтронов реактора ИБР-2 на основе дисперсного мезитилена с системой охлаждения: Дис. ... канд. тех. наук: 01.04.01. Дубна: ОИЯИ, 2019. 146 с.
11. *Куликов С.А.* Холодные замедлители нейтронов на основе твердых дисперсных водородосодержащих материалов: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.01. Дубна: ОИЯИ, 2017. 208 с.
12. *Bulavin M., Belyakov A., Verkhoglyadov A., Mukhin K., Kulikov S.* // J. Surf. Invest.: X-ray Synchrotron Neutron Tech. 2020. V. 14. № 3. P. 434. <https://doi.org/10.1134/S1027451020030040>
13. *Аксенов В.Л., Ананьев В.Д., Комышев Г.Г., Рогов А.Д., Шабалин Е.П.* // Письма в ЭЧАЯ. 2017. Т. 14. № 5. С. 556.
14. *Шабалин Е.П., Аксенов В.Л., Комышев Г.Г., Рогов А.Д.* // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 6. С. 309.
15. *Лопаткин А.В., Третьяков И.Т., Романова Н.В., Горячих А.В., Кокорин Н.Д., Попов В.Е., Мороко В.И., Кравицова О.А., Аксенов В.Л., Куликов С.А., Рзынин М.В., Швецов В.Н., Шабалин Е.П.* // Атомная энергия. 2020. Т. 129. № 4. С. 226.
16. *Пепельшев Ю.Н., Виноградов А.В., Рогов А.Д., Сидоркин С.Ф.* // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18. № 1(233). С. 98.
17. *Шабалин Е.П.* // Журн. физика элементарных частиц и атомного ядра. 2005. Т. 36. № 6. С. 1425.
18. *Gobrecht K.* World Directory of Cold and Ultra-Cold Neutron Sources. http://www.ottosix.com/download/cns_world_directory2007.pdf
19. *Carpenter J.M., Schulke A.W., Scott T.L. et al.* The IPNS Grooved Solid Methane Moderator // 8th International Collaboration of Advanced Neutron Sources. Oxford, 1985. V. 1. P. 311.
20. *Utsuro M., Sugimoto M.* // J. Nucl. Sci. Tech. 1977. V. 14. P. 390.
21. *Clark D.D., Hossain T.Z., Hammer D. et al.* // Nucl. Sci. Eng. 1992. V. 110. № 4. P. 445.
22. *Ikeda S.* Cold Neutron Moderator at KENS-I // 9th International Collaboration on Advanced Neutron Sources. Villingen, 1986. V. II. P. 18.
23. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. et al.* Solid Methane Cold Moderator for the IBR-2 Reactor // The International Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources. Argonne, 1997. P. 73.
24. *Gobrecht K.* The ILL Cold Sources // The International Workshop on Cold Neutron Sources. Los Alamos, 1990. P. 19.
25. *Шабалин Е.П.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2005. Т. 36. № 6. С. 1425.
26. *Wehring B.W., Unlu K.* The University of Texas Cold Neutron Source // 2nd International Seminar on Advanced Pulsed Neutron Sources. Dubna, 1994. P. 285.
27. *Unlu K., Rios-Martinez C., Wehring B.W.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 1995. V. 193. № 1. P. 145.
28. *Utsuro M., Sugimoto M., Fujita Y.* Experimental Study on a Cold Neutron Source of Solid Methylbenzene / Annual Report Research Reactor Institute. Kyoto University. 1975. Report 8. P. 17.
29. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. et al.* Solid Methane Cold Moderator at the IBR-2 Reactor: Test Operation at 2 MW // 2nd International Meeting on Pulsed Advanced Neutron Sources. Dubna, 1994. P. 217.
30. *Scott T.L., Carpenter J.M., Miller M.E.* The Development of Solid Methane Neutron Moderators at the Intense Pulsed Neutron Source Facility of Argonne National Laboratory // Proc. of the Argonne National Laboratory. Argonne, 1998. P. 299.
31. *Bulavin M.V., Yskakov A., Mukhin K.A.* // RAD Conf. Proc. 2020. V. 4. P. 81. <https://doi.org/10.21175/RadProc.2020.17>
32. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. et al.* Some Radiation Effects in Cold Moderator Materials: Experimental Study // 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources. Dusseldorf, 2003. V. 2. P. 911.
33. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. et al.* // Rad. Phys. Chem. 2003. V. 67. P. 315.
34. *Shabalin E.* Cold Moderator Materials: Comparative Feasibility, Engineering Aspects. http://nrd.pnpi.spb.ru/UCN_CNS/cn/shabalin.pdf

35. *Cher L.* Organic Compounds for Cold Moderators // 14th Int. Conf. on Advanced Neutron Sources. Starved Rock, Illinois, 1998. V. 2. P. 241.
36. *Пушежецкий С.Я.* Механизм и кинетика радиационно-химических реакций. М.: Химия, 1968. 368 с.
37. *Carpenter J.* // Nature. 1987. V. 330. P. 358.
38. *Shabalin E.P.* // Joint Inst. Nucl. Res. Commun. 1995. E17-95-142.
39. *Kulikov S., Ananiev V., Belyakov A. et al.* // JPS Conf. Proc. 2018. V. 22. P. 011001.
40. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2004. V. 215. Iss. 1–2. P. 181.
41. *Shabalin E.P.* Consideration of the “Burp” Phenomenon in Solid Methane Accounting for Nonuniform Distribution of Irradiation Defects // Proc. of the Argonne National Laboratory. Argonne, 1997. P. 245.
42. *Гольданский В.И., Руманов Э.Н., Шабалин Е.П.* // Химическая физика. 1999. № 18. С. 16.
43. *Carpenter J.* Cold Moderator for Pulsed Neutron Sources // Proc. of the Los Alamos Neutron Science Center. Los-Alamos, 1990. P. 131.
44. *Inoue K., Iwasa H., Kiyonagi Y.* // J. Atom. En. Soc. Jpn. 1979. V. 21. Iss. 11. P. 865.
45. *Utsuro M.* // J. Phys. C. 1976. V. 9. P. 171.
46. *Natkaniec I., Holderna-Natkaniec K., Kalus J.* // Physica B. 2004. V. 350. P. 651.
47. *Рязанцев С.В., Саночкина Е.В., Тюльпина И.В. и др.* Исследование радиационно-химических превращений в системах на основе мезитилена и смесей мезитилен-ксилол. Научно-технический отчет о НИР, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2014. 41 с.
48. *Булавин М.В., Верхоглядов А.Е., Куликов С.А. и др.* Радиационные превращения в водородосодержащих материалах холодного замедлителя реактора ИБР-2 // Седьмая Российская школа по радиохимии и ядерным технологиям. Озерск, 2016. С. 17.

Some Features of Operation of the Pelletized Cryogenic Moderators Based on Mesitylene at the IBR-2 Pulsed Fast Reactor

**M. V. Bulavin^{1, 2}, K. A. Mukhin^{1, 2}, A. Yskakov^{1, 3, *}, A. D. Rogov¹,
A. V. Galushko¹, V. A. Skuratov¹, I. A. Smelyansky¹**

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

²Petersburg Nuclear Physics Institute, NRC “Kurchatov institute”, Gatchina, 188300 Russia

³Institute of Nuclear Physics, Almaty, 050032 Kazakhstan

*e-mail: yskakov@jinr.ru

The radiochemical and neutron-physical characteristics of a pelletized cryogenic moderator based on mesitylene mixture (a mixture in the form of frozen balls) obtained during its operation at the pulsed fast reactor IBR-2 are presented. It is shown that the changes in the properties of the mixture at high absorbed irradiation doses (~100 MGy) have no significant effect on the spectrum of cold neutrons. The gain in the number of cold neutrons from the surface of a cold moderator in comparison with a water moderator reaches 10 times. There is no degradation of the neutron flux at the end of the reactor duty cycle. If the technology of continuous change of the working substance in the cryogenic moderator chamber is successfully developed, the frozen mixture of mesitylene and methaxylene can be recommended for use on powerful pulsed neutron sources.

Keywords: cryogenic moderator, aromatic hydrocarbons, mesitylene, methaxylene, absorbed dose, radiolytic hydrogen, viscosity, neutron spectrum, pulsed neutron source.