

P13-2004-73

Е. П. Шабалин, С. А. Куликов

ХОЛОДНЫЙ ЗАМЕДЛИТЕЛЬ НЕЙТРОНОВ
НА ОСНОВЕ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Шабалин Е. П., Куликов С. А.

P13-2004-73

Холодный замедлитель нейтронов
на основе ароматических углеводородов

Обсуждается возможность создания холодного замедлителя для источников нейтронов средней интенсивности (исследовательских реакторов мощностью 1–5 МВт или источников на базе сильноточных протонных ускорителей мощностью 0,2–1 МВт) на основе ароматических углеводородов (меситилена с добавками *m*-ксилола или псевдокумола), и рассматриваются его преимущества. Подробно описан технически реализуемый вариант конструкции меситиленового холодного замедлителя с высокой степенью безопасности и большим ресурсом.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Перевод авторов

Shabalin E. P., Kulikov S. A.

P13-2004-73

Aromatic Hydrocarbons Based Cold Neutron Moderator

Advantages and feasibility of aromatic hydrocarbons based (mesitylene, and mixture with *m*-xylene and pseudocumene) cold neutron moderators for the mild intensity sources (research reactors of 1–5 MW power or spallation sources of 0.2–1 MW) are discussed in the article. Detailed technical construction of mesitylene cold neutron moderator with high safety and durability is presented as well.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

ВВЕДЕНИЕ

В замедлителях нейтронов осуществляется снижение энергии быстрых нейтронов источника вплоть до их термализации, при этом создается нужный спектр внешних нейтронных пучков. Наиболее востребованы для новых проектов интенсивных нейтронных источников холодные замедлители (ХЗ) с температурой замедляющего вещества 20–100 К, которые дают повышенный выход холодных нейтронов с длиной волны более 4 Å. В ныне действующих замедлителях в качестве замедляющего вещества используют обычную воду, жидкий водород, жидкие углеводороды (метан, пропан), твердый метан. В принципе, возможно применение еще водяного льда (далее лед), полиэтилена, замороженных смесей метана с инертным газом или ненасыщенными углеводородами, метана в цеолитах, гидратов метана, аммиака, ароматических углеводородов (в частности, триметилбензола) и др.

Для замедлителей тепловых нейтронов проблемы нет: здесь однозначно используется обычная вода. Другой вопрос — ХЗ. В связи с проблемами теплоотвода и радиационной стойкости разработка конструкции ХЗ нейтронов для интенсивного источника (реактора с мощностью более 1 МВт или источника на основе протонного ускорителя мощностью более 0,1–0,2 МВт) представляет собой сложную и еще до конца не решенную задачу. Такой замедлитель должен иметь большой ресурс работы в полях радиации до 0,3–0,5 кГр/с, обеспечивать высокую эффективность нейтронных спектрометров и функционировать в широком интервале температур — от 20 до 100 К.

Наиболее технологичным и чаще всего применяемым веществом для ХЗ является жидкий водород, который используется в 20 из 30 ныне действующих ХЗ [1]. Главное его достоинство — отсутствие радиолитического и радиационных эффектов. Однако термализация нейтронов в жидководородном замедлителе происходит не полностью, что объясняется отсутствием низколежащих уровней возбуждения у молекулы водорода. К тому же водород взрывоопасен, и случаи взрывов жидководородных замедлителей (как минимум два) известны. В этих случаях не было серьезных последствий, так как реакторы стационарного действия в 40 раз менее чувствительны к изменению их геометрии, чем импульсный реактор ИБР-2. Аналогичная ситуация на ИБР-2 привела бы к серьезной ядерной аварии. В этом главная причина отказа от использования жидкого водорода на ИБР-2.

Метан оказывается более эффективным для замедления нейтронов, потому что его молекула имеет низколежащий вращательный (ротационный) уровень 1 мэВ, это, наряду с большой плотностью ядер водорода, делает метан по нейтронно-физическим свойствам наилучшим из всех до сих пор известных веществ (см. рис. 1). Выход холодных нейтронов из твердого метана при температуре 20 К в 2–3 раза выше, чем из водорода. Метан также удобен тем, что может быть использован в сравнительно широком интервале температур. Известно, что сейчас на ИБР-2 действует один ХЗ с твердым метаном [3–5], используемый при 30–70 К. Еще три замедлителя на твердом метане функционируют в США (Аргоннская лаборатория, IPNS) и Японии (Цукуба, KENS) [6, 7]. Главный же недостаток метана — низкая радиационная стойкость. В процессе работы метанового замедлителя на ИБР-2 по 2–3 раза в сутки необходимо менять температурный режим (для «выгонки» накопившегося водорода), что вызывает нестабильность нейтронного спектра. Каждые два дня производится замена метана в IPNS. Кроме того, ресурс работы метанового замедлителя невелик из-за накопления в камере смол — твердых продуктов радиолитического распада.

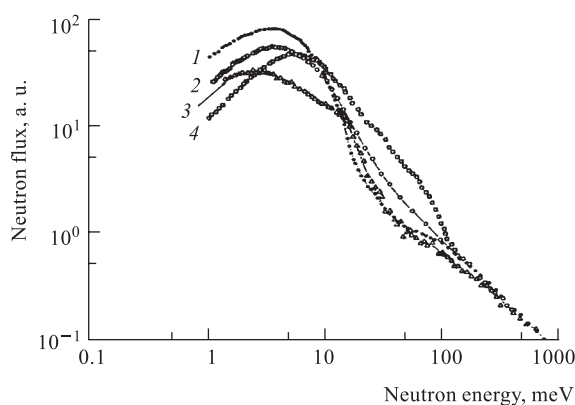


Рис. 1. Спектр нейтронов из различных материалов [2]: 1 — CH_4 , $T = 31$ К; 2 — $\text{C}_6\text{H}_3(\text{CH}_3)_3$, $T = 25$ К; 3 — H_2 , $T = 18$ К; 4 — H_2O , $T = 30$ К

Вообще, проблема радиационной стойкости материалов ХЗ является первостепенной при их проектировании. Из радиационных эффектов при облучении замороженных водородсодержащих газов и жидкостей при температурах 20–100 К наиболее существенны следующие четыре.

- Образование радиолитического водорода; при отогреве расширяющийся газ водорода вызывает распухание твердой матрицы вещества замедлителя (метана, льда, мезитилена и др.) и значительные деформации металлических стенок камеры замедлителя [8, 9].

- Образование «замороженных» радикалов; при достижении критической их концентрации (которая достигается, например, во льду за 5 ч при мощности дозы 0,1 кГр/с) возможно развитие цепной реакции рекомбинации и, соответственно, саморазогрев вещества [10–16].

- Образование высокомолекулярных высококипящих продуктов, которые трудно удалить из камеры ХЗ и которые могут накопиться в значительных количествах [5].

- Снижение теплопроводности [17].

1. МЕЗИТИЛЕН — КОМПРОМИСС ЭФФЕКТИВНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ

В качестве действующего вещества ХЗ для нейтронных источников средней мощности (исследовательские реакторы малого размера до 5 МВт или источники на основе сильноточных протонных ускорителей до 1 МВт) предлагается использовать мезитилен (1,3,5-триметилбензол, ароматический углеводород C_9H_{12} , производная бензола).

Физические и теплофизические свойства мезитилена:

- плотность при 20 °С 0,86 г/см³, при 20 К — около 1 г/см³;
- теплоемкость твердого мезитилена при температуре 20 К 0,2 Дж/г/К, при 80 К — 0,6 Дж/г/К [18];
- температура и теплота плавления 228 К и 100 Дж/г соответственно;
- температура и теплота испарения (при давлении 1 бар) 437 К и 320 Дж/г соответственно;
- теплопроводность при 20–40 К 0,2 Вт/м/К;
- теплоемкость пара мезитилена при температуре 600 К 2,3 Дж/г/К;
- давление насыщенных паров 1,86 мм Hg при 20 °С, 2,49 мм — при 25 °С, 14 мм — при 55 °С;
- вязкость 0,00813 см²/с при 20 °С, 0,0048 см²/с при 100 °С;
- температура поджига паров 50 °С, в замкнутом объеме — 46 °С;
- самовоспламенение 550–559 °С.

Свойства мезитилена как замедлителя нейтронов. Три свойства мезитилена наиболее привлекательны для использования его как замедлителя, особенно в сильных полях излучения.

Первое свойство мезитилена — высокая радиационная стойкость по сравнению с метаном или льдом. Сравнительные и абсолютные радиационные свойства даны в работах [12, 17, 19–21]. Например, выход водорода в мезитиле не в 10 раз ниже, чем в метане, а в смеси его с толуолом или *m*-ксилолом — даже в 20 раз. Накопления радикалов в мезитиле не практически нет, и, соответственно, нет спонтанных всплесков температуры, таких как в метане или во льду [6, 10–15]. Не существует указаний в литературе на радиационную

полимеризацию мезитилена [20–21], что крайне важно в плане долгосрочности ресурса камеры замедлителя, которая не будет забиваться твердыми продуктами радиолиза.

Суть второго свойства мезитилена — наличие в молекуле трех комплексов CH_3 , которые совершают слегка заторможенное вращение вокруг оси симметрии комплекса. При этом энергия вращательных колебаний составляет 7 мэВ в твердом кристаллическом мезитиле и 5 мэВ — в твердых смесях мезитилена с другими производными бензола, в которых доминирует структура «протонного стекла» [22–25]. Такие низкие энергетические уровни молекул способствуют быстрой термализации нейтронов. Имеющиеся экспериментальные данные как по сечениям неупругого рассеяния, так и непосредственные измерения спектров холодных нейтронов показывают, что данный материал по выходу холодных нейтронов находится между твердым метаном (наилучший замедлитель) и жидким водородом и значительно лучше льда.

И третье положительное свойство мезитилена — широкий интервал температур, в котором он находится в конденсированных фазах: в твердой фазе — ниже 228 К, а в интервале от -45 до $+164^\circ\text{C}$ — в жидкой фазе. Загрузка и выгрузка мезитилена из полости замедлителя удобна тогда при комнатной температуре, а варьирование температуры в процессе работы позволяет оптимизировать спектр нейтронов в соответствии с требованиями эксперимента. Немаловажно и то обстоятельство, что мезитилен не взрывоопасен и менее горюч, чем метан или водород.

Таким образом, будучи

– достаточно эффективным замедлителем нейтронов вплоть до области холодных нейтронов, позволяющих использовать его в широком интервале температур,

– удобным материалом в смысле проведения технологических процедур,

– наиболее радиационно-стойким из всех возможных водородсодержащих веществ для ХЗ (кроме жидкого водорода),

– менее горючим, чем метан и водород, и взрывобезопасным,

мезитилен, и особенно его смесь с *m*-ксилолом или псевдокумолем [25], является весьма подходящим веществом ХЗ нейтронов для современных источников нейтронов средней интенсивности, представляя собой хороший компромисс между функциональными и технологическими свойствами.

Мезитилен уже использовался и используется как ХЗ на источниках низкой интенсивности [26–31] с радиационной нагрузкой не более 0,05 Вт/г. Однако при соответствующей конструкции он может работать и при нагрузках на порядок больше — до $\sim 0,5\text{--}0,7$ Вт/г.

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МЕЗИТИЛЕНОВОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ ДЛЯ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

ХЗ на основе мезитилена может быть изготовлен в виде сборки цилиндрических трубок диаметром 10–15 мм из циркония (циркаллой), в которых находится твердый мезитилен при температуре 20–40 К. Трубки (далее называются холодными твэлами) упакованы достаточно плотно для достижения максимальной плотности мезитилена. Их количество и высота определяются необходимыми размерами замедлителя, а диаметр — тепловой нагрузкой. На рис. 2 и 3 дана схема концептуального варианта замедлителя для одного нейтронного канала с размером «светящегося» пятна около 10 см. Конструкция замедлителя другого размера не будет принципиально отличаться. В этом варианте количество трубок 45.

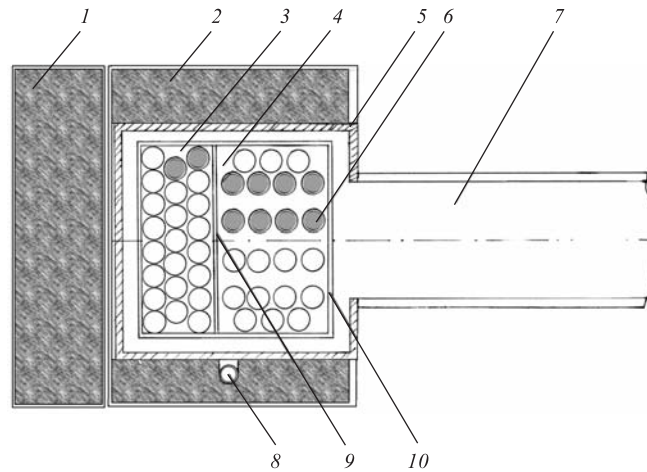


Рис. 2. Схема ХЗ (горизонтальное сечение): 1, 2 — водяной предзамедлитель, 3 — первая камера замедлителя, 4 — вторая камера замедлителя, 5 — вакуумный кожух замедлителя, 6 — холодные трубки с мезитиленом во второй камере, 7 — вакуумированная труба вывода нейтронов, 8 — байпасная трубка, 9 — перегородка между камерами, 10 — корпус камер

Ввиду очень низкой теплопроводности мезитилена внутри каждой трубки помещают систему теплопроводов из чистого технического алюминия (АД1). Эта мера повышает эффективную теплопроводность в 3–4 раза и, соответственно, снижает температуру мезитилена без заметного влияния на выход холодных нейтронов. Градиент температуры по мезитилену должен быть как можно

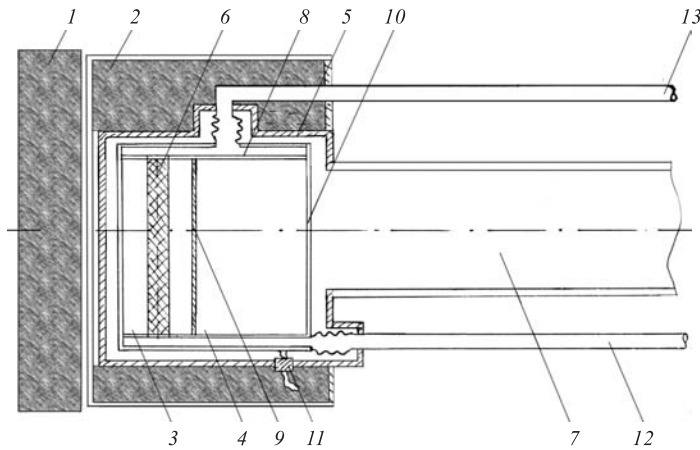


Рис. 3. Схема ХЗ (вертикальное сечение): 1, 2 — водяной предзамедлитель, 3 — первая камера замедлителя, 4 — вторая камера замедлителя, 5 — вакуумный кожух замедлителя, 6 — холодные трубки с мезитиленом в первой камере, 7 — вакуумированная труба вывода нейтронов, 8 — верхняя решетка крепления холодных трубок, 9 — перегородка между камерами, 10 — корпус камер, 11 — ввод электропитания нагревателя, 12 — трубка ввода-слива мезитилена из нижнего коллектора, 13 — продувочная трубка

меньше, желательно не более 5 К. В то же время объемная доля алюминия не должна превышать 3–5 %, чтобы не снизить выход холодных нейтронов. Тепловыделение в мезитилене, которое возникает из-за замедления быстрых нейтронов и поглощения гамма-квантов реактора через стенки холодных твэлов передается охлаждающему гелию.

Холодные твэлы находятся в двух разделенных перегородкой камерах. В первой, ближайшей к источнику нейтронов (отражателю реактора), находятся 23 холодных твэла в тесной упаковке (зазор между трубками 1 мм), размер камеры в направлении нейтронного пучка 3,4 см. Во второй камере холодные твэлы расположены особым образом (см. рис. 3), так что образуется так называемая геометрия «гребенчатого» (grooved type) замедлителя [32]. Нейтроны в сторону выведенного пучка испускаются с поверхности первой камеры через пустоты между рядами стержней, т. е. из зоны, где плотность потока нейтронов примерно в 8 раз выше, чем на поверхности плоского замедлителя. В результате поток нейтронов в выведенном пучке возрастает в два раза [33].

Холодные твэлы вварены в нижнюю и верхнюю решетки, которые являются двумя сторонами гелиевой камеры, имеющей форму параллелепипеда. Решетки и стенки гелиевой камеры изготавливаются из того же материала,

что и холодные твэлы, во избежание термических деформаций. Холодный гелий подается и отводится по нескольким изолированным трубкам через боковые стенки камеры, ортогональные к направлению вывода пучка холодных нейтронов. Таким образом, гелий обдувает пучок холодных твэлов поперек их оси. Суммарное тепловыделение в мезитиле и металле замедлителя (без вакуумного кожуха) для условий его работы на реакторе ИБР-2 составит 150–160 Вт.

Гелиевая камера теплоизолирована созданием вакуума между ее стенками и внешним вакуумным кожухом. Со стороны вывода пучка холодных нейтронов в вакуумный кожух может быть вварена труба вывода нейтронов, которая в этом случае одновременно служит для откачки воздуха из вакуумного кожуха.

Для обеспечения загрузки и удаления отработанного мезитилена и продуктов его радиолитического распада служат коллекторы и система трубопроводов. В данной концепции возможны несколько вариантов конструкции коллекторов. Здесь приводится наиболее надежный, на взгляд авторов, вариант.

Трубки с мезитиленом имеют открытые с обеих сторон торцы; внутренняя полость трубок соединяется с коллекторами мезитилена небольшой высоты (около 10 мм). Полости коллекторов мезитилена отделены от вакуумной полости. В нижней стенке нижнего коллектора установлен пространственно-распределенный (плоский) электронагреватель, включаемый на время заполнения и замораживания мезитилена. Возможна конструкция без нагревателя; в этом случае его заменяет тепловая связь по металлической ленте между нижней стенкой нижнего коллектора и вакуумным кожухом. Размеры ленты должны быть подобраны для обеспечения нужного перепада температур между стенкой нижнего коллектора и охлаждающим гелием (30–50 К). В обоих вариантах загрузка мезитилена возможна и тогда, когда источник нейтронов (реактор) не работает. Температурные деформации в стенках коллектора можно свести до приемлемых значений путем оптимизации их формы и размеров, а также выбором циркония (точнее, его сплава — циркаллой, принятого в реакторной технологии) как материала для холодных твэлов, стенок коллектора и гелиевой камеры: тепловое расширение циркония в 4 раза меньше, чем алюминия.

От верхнего коллектора отходят две теплые трубки диаметром 5–10 мм; нижняя боковая, соединенная на дальнем конце (вне биологической защиты) с резервуарами свежего и отработанного мезитилена, служит для подвода и отвода мезитилена, а верхняя — для газовой продувки (см. рис. 4). Имеется возможность соединения этой трубки с выходом в спецвентиляцию, что препятствует образованию газовых пробок. Сливная (нижняя) трубка должна иметь по возможности уклон вниз. От нижнего коллектора отходит теплая трубка для подвода и отвода мезитилена, соединенная с резервуарами свежего и отработанного мезитилена. Имеется также теплый байпас (например,

проходящий в воде предзамедлителя) между верхним коллектором и нижней сливной трубкой. Его наличие обеспечивает свободный слив незамороженного мезитилена из нижнего коллектора после его замораживания в трубках. Сливная трубка должна иметь по возможности уклон в сторону резервуаров.

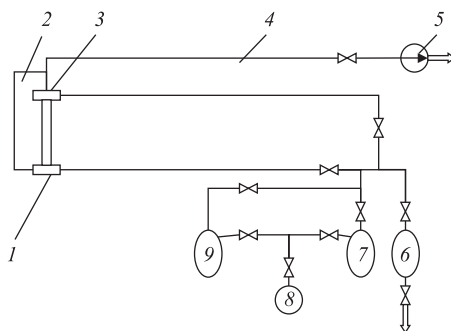


Рис. 4. Упрощенная схема мезитиленового трубопровода: 1 — нижний коллектор для жидкого мезитилена, 2 — байпасная труба, 3 — верхний коллектор для жидкого мезитилена, 4 — труба для газовой продувки, 5 — вакуумный насос, 6 — резервуар для отработанного мезитилена, 7 — резервуар для свежего мезитилена, 8 — баллон с газом гелия, 9 — транспортный контейнер для мезитилена

Такое устройство коллекторов и схемы трубопроводов позволяет легко заполнять ХЗ мезитиленом и сливать отработанное вещество, что существенно ввиду очень низкого давления паров мезитилена при комнатной температуре. Это свойство затрудняло бы откачку мезитилена из трубок после его использования, если бы последние были не сквозными (имели доньшко). Кроме того, сквозные трубки позволяют промывать их потоком растворителя (того же мезитилена или другого) по мере накопления твердых продуктов радиолитиза. Правда, в литературе нет указаний на процесс полимеризации мезитилена под облучением [20, 21], в отличие от метана, где скорость накопления смол очень велика — порядка $3 \cdot 10^{-7}$ г/Дж поглощенной энергии [5]. Пары легкокипящих продуктов радиолитиза удаляются через продувочную трубку в спецвентиляцию.

Трубопроводы мезитилена всегда заполнены газообразным гелием при давлении выше атмосферного. Это препятствует проникновению воздуха.

Перед холодной камерой, в воде предзамедлителя, может быть установлен свинцовый экран толщиной 2–3 см, существенно снижающий тепловыделение в замедлителе и лишь немного уменьшающий поток холодных нейтронов.

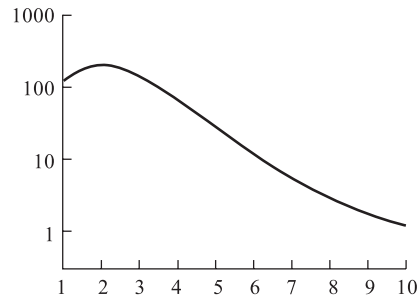


Рис. 5. Поток нейтронов из мезитиленового замедлителя на единицу длины волны нейтрона (отн. ед.) как функции длины волны нейтронов (Å)

Дифференциальный спектр нейтронов утечки из замедлителя, рассчитанный по программе MCNP, дан на рис. 5. Расчеты сделаны с использованием библиотеки сечений взаимодействия медленных нейтронов с мезитиленом (кристаллическая фаза III), приготовленной в Атомном центре в Барилоче (Аргентина) [35].

3. РАСЧЕТ ТЕПЛОВODOВ ВНУТРИ ХОЛОДНЫХ ТРУБОК С МЕЗИТИЛЕНОМ

Были рассмотрены четыре конструкции тепловодов, показанные на рис. 6. В реальной конструкции в точках касания металлической пластины с оболочкой она будет продолжена на некоторое расстояние дугой окружности вдоль оболочки для обеспечения передачи тепла к оболочке и охлаждающему гелию. Это обеспечит температуру в точках касания, близкую к температуре оболочки.

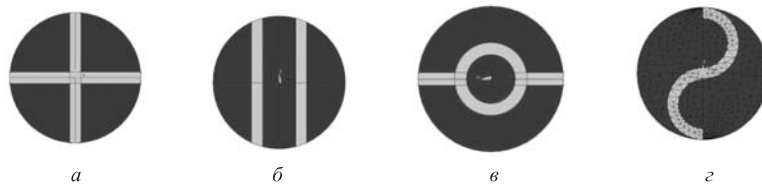


Рис. 6. Варианты конструкций тепловодов в трубках мезитилена: *a* — «крест», *б* — «продольные металлические пластины», *в* — «кольцо с перемычками», *г* — «полуокружности»

Толщина алюминиевых пластин в поперечном сечении в расчетах бралась равной 0,1 мм. Высота цилиндрического элемента 10 см, диаметр 10 мм

(внутренний). Тепловой расчет велся по программе решения уравнения теплопроводности в 3D-геометрии на основе метода Монте-Карло. Результаты расчетов представлены в таблице.

Максимальная температура мезитилена (перегрев относительно температуры оболочки) в различных геометриях теплопроводов при тепловыделении 1 Вт/г

Теплопроводов нет	«Крест»	«Продольные металлические пластины»	«Кольцо с перемычками»	«Полуокружности»
31,2	8,0	8,0	5,8	15

Таким образом, геометрия «кольцо с перемычками» позволяет достигнуть минимального градиента температур. Однако геометрию с «продольными металлическими пластинами» или «крестом» технологически осуществить гораздо легче, и потому они более предпочтительны для проекта ХЗ. Интересно отметить, что фактор снижения градиента температуры примерно пропорционален числу секторов в сечении цилиндрического элемента, на которые оно делится пластинами. Действительно, «полуокружности» делят сечение пополам, и градиент уменьшается вдвое. Крест и три пластины делят сечение на четыре сектора, и градиент уменьшается почти в четыре раза.

4. ОБ ОТЖИГЕ МЕЗИТИЛЕНА

В процессе работы ХЗ раз в несколько суток (в зависимости от радиационной нагрузки на мезитилена) необходимо производить отжиг мезитилена до температуры 150–170 К для освобождения накопившегося радиолитического водорода. Как уже было сказано, количество аккумулированного в твердом холодном мезитилена водорода следует ограничивать, так как при отогреве повышающееся давление пузырьков газа водорода вызывает распухание мезитилена, и, как следствие, давление на стенки холодных трубок. Это может привести к их повреждению, аналогичному тому, что происходило с камерами метана холодных замедлителей на IPNS и ИБР-2 [8, 9]. Оценка, основанная на предположении, что водород заполняет объем, равный разности между объемом матрицы мезитилена и суммарным объемом всех его молекул, дает значение давления на стенки трубки при 130 К (это та температура, при которой водород выходит из мезитилена [17]) около 400 бар на 1 МДж энергии, поглощенной в одном грамме мезитилена, что соответствует давлению распухающего мезитилена на стенки трубок 34 бара при отогреве до 130 К после

работы в течение суток при энерговыделении 1 Вт/г. Данное обстоятельство и является главной причиной выбора трубчатой конструкции замедлителя: трубка малого диаметра выдерживает значительные давления. Если приведенная выше оценка величины давления справедлива, то функционирование мезитиленового замедлителя реально возможно при энерговыделении не более $\sim 0,5-0,7$ Вт/г. Приведенные оценки давления могут быть уточнены экспериментально на макете холодной трубки с мезитиленом, облучаемой протонами с энергией 30–35 МэВ или электронами с энергией более 8 МэВ.

5. АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ

Потеря охлаждения. Наличие четырех выводных трубок из мезитиленовой полости полностью гарантирует невозможность их одновременной блокировки. Испарение мезитилена после прекращения циркуляции гелия начнется не ранее чем через 20 мин (при тепловыделении 0,3 Вт/г). За это время произойдет самоудаление мезитилена по нижней трубке; если же она окажется заблокированной, то в случае незаблокированной байпасной трубки (деталь 9 на рис. 2) возникнет естественная циркуляция жидкого мезитилена или жидко-паровой смеси. В случае блокировки байпасной и нижней трубок пар мезитилена будет отводиться по оставшимся свободными верхним трубкам. При потере теплоносителя, одновременной блокировке нижней и байпасной трубок и попадании воздуха в верхние трубки возгорания паров мезитилена не произойдет, температура самовозгорания $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ не может быть достигнута, так как тепло от металла будет отводиться лучистым переносом к стенкам вакуумной полости. В этом случае расчет дает значение максимальной температуры мезитиленовых трубок при отсутствии гелия и жидкого мезитилена не более $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Реальная температура будет еще ниже благодаря эффекту «тепловой трубы»: пары мезитилена будут частично конденсироваться на охлаждаемых водой трубках, отдавая тепло. Возгорание от пламени или искры (температура поджига $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) едва ли возможно из-за наличия гелиевой атмосферы с повышенным давлением.

Таким образом, потеря охлаждения гелием не приведет к каким-либо неприятным последствиям: камера не будет повреждена при любых дополнительных отказах оборудования.

Разрыв вакуумного кожуха. Попадание воды в вакуумное пространство не влечет за собой неприятных последствий. При малой течи капли воды будут замерзать при попадании в вакуум, не нарушая процесса охлаждения замедлителя. Постепенное ухудшение вакуума вызовет необходимость размораживания мезитилена по рабочей схеме.

При значительной течи воды, когда она не будет успевать замораживаться в вакууме, быстрый нагрев корпуса замедлителя может привести к его

деформациям и повреждениям. Однако при контакте воды с мезитиленом не происходит химического взаимодействия, и, соответственно, исключается возможность воспламенения, взрыва и т. п.

Радиационная безопасность. В результате облучения мезитилена образуется два радиоактивных изотопа: изотоп углерода C^{14} (период полураспада 5570 лет) и тритий (период полураспада 12,26 лет). В потоке нейтронов $\sim 3-4 \cdot 10^{13}$ см²/с, который будет, например в замедлителе реактора ИБР-2М, за сутки будет образовываться $\sim 2 \cdot 10^4$ Бк/кг изотопа C^{14} и $6 \cdot 10^4$ Бк/кг трития. Из расчета времени работы одной загрузки мезитилена 11 сут полная β -активность отработанного мезитилена за год составит $4 \cdot 10^6$ Бк, а удельная активность — $7 \cdot 10^5$ Бк/л. Это составляет около 2 % от удельной β -активности жидкости, разрешенной к утилизации нормами безопасности России [34]. Следует подчеркнуть, что при использовании жидкого водорода как замедлителя в тех же условиях накопление трития шло бы примерно с такой же интенсивностью, и наработанную за год активность $\sim 3 \cdot 10^6$ Бк пришлось бы сбрасывать в атмосферу. Поэтому использование мезитилена в качестве замедлителя лучше в отношении радиационной безопасности, чем водорода.

6. ВЫВОДЫ

1. В качестве рабочего вещества ХЗ для источников нейтронов средней интенсивности (исследовательских реакторов мощностью 1–5 МВт или сильноточных протонных ускорителей с мощностью пучка 0,2–1 МВт) рационально использовать органическое вещество — ароматический углеводород мезитилен с добавкой другого ароматического углеводорода (*m*-ксилола или псевдокумола) при температуре 20–30 К. Его главные преимущества в сравнении с другими возможными веществами (метан, водород, вода) — высокая радиационная стойкость, широкий интервал температур использования, более высокая безопасность (как в отношении взрывоопасности, так и в радиационном плане).

2. Мезитиленовый ХЗ представляет собой хороший компромисс между функциональными (выход нейтронов) и технологическими свойствами.

3. В работе подробно описан технически реализуемый вариант конструкции мезитиленового ХЗ с высокой степенью безопасности и большим ресурсом.

Авторы выражают благодарность А. А. Кайгородову и В. В. Мелихову за участие в расчете тепловодов, В. Л. Аксену за активную поддержку работ по разработке мезитиленового замедлителя и профессору Р. Гранде за предоставление библиотеки с нейтронными сечениями мезитилена. Следует особо отметить, что стимулом для этой разработки послужили основополагающие

результаты И. Натканца по неупругому рассеянию нейтронов ароматическими углеводородами и его предложение по использованию их смесей.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://perso.wanadoo.frottosix.com/>
2. *Utsuro M., Sugimoto M., Fujita Y.* // Ann. Rep. Res. Reactor Inst. Kyoto Univ. 1975. V. 8. P. 17.
3. *Belyakov A. A., Melikhov V. V., Pepelyoshev Yu. N., Shabalin E. P.* Solid Methane Cold Moderator at the IBR-2 Reactor // J. of Neutron Res. 1996. V. 3. P. 209–221.
4. *Beliakov A. A., Tretiakov I. T., Shabalin E. P., Golikov V. V., Luschikov V. I.* Solid Methane Cold Moderator for the IBR-2 Reactor // Proc. of the Intern. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, ANL, Argonne, Illinois, USA, Sep. 29–Oct. 2, 1997. OECD Brochure, 1998. P. 73–78.
5. *Beljakov A. A., Tretiakov I. T., Shabalin E. P.* First Experience with the New Solid Methane Moderator at the IBR-2 Reactor // Proc. of the 15th Meeting of Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XV), Tsukuba, Japan, Nov. 6–9, 2000.
6. *Carpenter J.* Cold Moderator for Pulsed Neutron Sources // Proc. of the Intern. Workshop on Cold Neutron Sources, Los-Alamos, USA, March 5–8, 1990. LA-12146-C. 1991. P. 131–153.
7. *Ikeda S., Watanabe N., Satoh S., Furusaka M., Inoue K.* Cold Neutron Moderator at KENS-I // Proc. of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources 9 (ICANS-IX), PSI, Villigen, Sept. 22–26, 1986. V. II. P. 18–26.
8. *Shabalin E. P., Beljakov A. A., Ermilov V. G., Melikhov V. V.* Solid Methane Cold Moderator at the IBR-2 Reactor: Test Operation at MW // Advanced Pulsed Neutron Sources: Proc. of the Second Intern. Meeting on Pulsed Advanced Neutron Sources PANS-II, Dubna, June 14–17, 1994. Dubna, 1995.
9. *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 Intern. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, ANL, Argonne, Illinois, USA, Sep. 29–Oct. 2, 1997. OECD Brochure, 1998. P. 299–304.
10. *Carpenter J.* Thermally Activated Release of Stored Chemical Energy in Cryogenic Media // Nature. 1987. V. 330. P. 358–360.
11. *Shabalin E. P.* On the Phenomenon of the Fast Release of Energy in Irradiated Solid Methane: Discussion of Models Considering the Local Space Distribution of Energy. JINR Commun. E17-95-142. Dubna, 1995.

12. *Shabalin E., Kulagin E., Kulikov S., Melikhov V.* Experimental Study of Spontaneous Release of Accumulated Energy in Irradiated Ices // *Rad. Phys. Chem.* 2003. V. 67, No. 3–4. P. 315–319.
13. *Kulagin E., Kulikov S., Melikhov V., Shabalin E.* Radiation Effects in Cold Moderator Materials: Experimental Study of Accumulation and Release of Chemical Energy // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2004. V. 215, No.1–2. P. 181–186.
14. *Shabalin E. P.* Consideration of the «Burp» Phenomenon in Solid Methane Accounting for Nonuniform Distribution of Irradiation Defects // *Proc. of the Intern. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, ANL, Argonne, Illinois, USA, Sep. 29–Oct. 2, 1997. OECD Brochure, 1998. P. 245–259.*
15. *Гольданский В. И., Руманов Э. Н., Шабалин Е. П.* Пределы распространения волн рекомбинации радикалов // *Хим. физика.* 1999. Т. 18, № 6. С. 16–20.
16. *Shabalin E. P., Kulikov S., Melikhov V.* Study of Fast Neutron Irradiation Effects in Cold Moderator Material // *Part. Nucl., Lett.* 2002. No. 5[114]. P. 82–88.
17. *Kulagin E., Kulikov S., Melikhov V., Shabalin E.* Some Radiation Effects in Cold Moderator Materials, Experimental Study // *Proc. of the 16th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, Düsseldorf-Neuss, Germany, May 12–15, 2003. V. II. P. 911–919.*
18. *Taylor R. D., Kilpatrick J. E.* // *J. Chem. Phys.* 1955. V. 23, No. 7. P. 1232–1235.
19. *Shabalin E.* Cold Moderator Materials: Comparative Feasibility, Engineering Aspects. PNPI, 2003.
20. *Cher L.* Organic Compounds for Cold Moderators // *Proc. of the Intern. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources, Argonne, Illinois, USA, Sept. 29–Oct. 2, 1997. A Brochure of the Megascience Forum of the OECD, 1998. P. 241–244.*
21. *Пшежецкий С. Я.* Механизм и кинетика радиационно-химических реакций. М.: Химия, 1968.
22. *Inoue K., Iwasa H., Kiyonagi Y.* // *J. At. Energy Soc. Japan.* 1979. V. 21. P. 865.
23. *Utsuro M.* A Simple Neutron Scattering Study of Proton Motion in Methyl Compounds // *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1976. V. 9. P. L171–L175.
24. *Natkanec I., Holderna-Natkanec K.* // *Proc. of the 16th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources (ICANS-XVI). 2003.*
25. *Natkanec I. et al.* Vibrational Spectra of Selected Methyl Derivatives of Benzene and Their Solutions as Potential Materials for Cold Moderators // *Ibid.*
26. *Utsuro M., Sugimoto M.* Pulsed Cold Source of Solid Methylbenzene // *J. Nucl. Sci. Tech.* 1977. V. 14, No. 5. P. 390–392.

27. *Ünlu K., Bauer T. L., Wehring B. W.* // Trans. Am. Nucl. Soc. 1992. V. 65. P. 135.
28. *Wehring B. W., Ünlu K.* The University of Texas Cold Neutron Source // Proc. of the Second Intern. Seminar «Advanced Pulsed Neutron Sources: Physics of/at Advanced Pulsed Neutron Sources» (PANS-II), Dubna, June 14–16, 1994; JINR Report D3-95-169. Dubna, 1995. P. 285–301.
29. *Clark David D., Ouellet C. G., Berg J. S.* On the Design of a Cold Neutron Source // Nucl. Sci. Eng. 1992. V. 110. P. 445–454.
30. *Clark David D., Takashi Emoto, Ouellet C. G., Pekar E., Berg J. S.* The Cornell University Cold Neutron Beam Facility: Design Features // Proc. of the Intern. Workshop on Cold Neutron Sources, Los-Alamos, USA, March 5–8, 1990. LA-12146-C. 1991. P. 559–563.
31. *Leuschner M.* USA LENS: A New Cold-Neutron Source for Research and Education. PNPI, 2003.
32. *Гундорин Н. А., Назаров В. М.* Препринт ОИЯИ Р3-80-721. Дубна, 1980.
33. *Kiyonagi Y.* Optimization of Grooved Thermal Moderator for Pulsed Neutron Source, and Its Characteristics // J. Nucl. Sci. Techn. 1984. V. 21, No. 10. P. 735–743.
34. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1 758–9. М-во здравоохранения РФ, 1999.
35. *Granada J., Gillette V. H., Scaffoni M. M., Pepe M. E.* // Proc. of ICANS XV Meeting, Tsukuba, 2000. LAERI-Conf 2001-002. P. 848–856.

Получено 18 мая 2004 г.

Редактор *О. Г. Андреева*

Подписано в печать 13.07.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,13. Уч.-изд. л. 1,37. Тираж 305 экз. Заказ № 54519.

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

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/