

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ШАРИКОВОГО КРИОГЕННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА ИБР-2

© 2013 г. В. Д. Ананьев, А. А. Беляков, А. А. Богдзель, М. В. Булавин, А. Е. Верхогляд, Е. Н. Кулагин, С. А. Куликов, А. А. Кустов, А. А. Любимцев, К. А. Мухин, Т. Б. Петухова, А. П. Сиротин, А. Н. Федоров, Е. П. Шабалин, Д. Е. Шабалин, В. К. Широков

*Объединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

Поступила в редакцию 07.12.2011 г.

После доработки 28.02.2012 г.

Представлена конструкция и приведены основные характеристики испытательного стенда, предназначенного для исследований работоспособности и определения оптимального режима работы шарикового криогенного замедлителя нейтронов на импульсном быстром реакторе ИБР-2. Испытательный стенд продемонстрировал возможность загрузки камеры замедлителя рабочим веществом в виде шариков из смеси ароматических углеводородов потоком холодного ($T < 85$ К) газа гелия по системе криогенных трубопроводов сложной конфигурации.

DOI: 10.7868/S0032816213010011

ВВЕДЕНИЕ

Нейтронные методы изучения структуры и свойств материалов находят широкое применение в современной физике конденсированного состояния [1]. Необходимость получения более полной и точной информации об изучаемых материалах способствует совершенствованию экспериментальной базы и методики проведения нейтронных экспериментов, в частности применению высокоинтенсивных пучков низкоэнергетических (“холодных”) нейтронов с энергией менее 5 мэВ (длиной волны более 4Å) [2].

Для генерации пучков холодных нейтронов применяют криогенные замедлители нейтронов. Они устанавливаются либо около активной зоны нейтронного источника, если источником служит ядерный исследовательский реактор, либо около облучаемой мишени, когда для производства нейтронов используют ускорители. Современный криогенный замедлитель содержит охлаждаемую до низких температур (20–100 К) камеру, заполненную замедляющим нейтроны материалом.

Основные требования, предъявляемые к таким материалам:

1) безопасность, обеспечиваемая сведением к минимуму наличия взрывоопасных и горючих материалов;

2) радиационная стойкость (предотвращение возможности накопления радиолитического водорода и свободных радикалов);

3) высокая вероятность замедления в объеме камеры (малая длина замедления) нейтронов и малое сечение поглощения нейтронов.

В качестве материалов для криогенных замедлителей, предназначенных для работы на импульсных источниках быстрых нейтронов, используют только водородсодержащие (предпочтительнее, содержащие дейтерий) материалы: жидкие водород, метан, пропан, ароматические углеводороды, лед воды [3–9] и др. Наиболее известные источники нейтронов, на которых эксплуатируются криогенные замедлители: реакторы FRM-II (Германия), ILL (Франция), ИБР-2 (Россия), источники нейтронов на основе ускорителей ISIS (Великобритания), SNS (США), SINQ (Швейцария) и др.

В настоящее время в ОИЯИ на реакторе ИБР-2 реализуется проект по созданию криогенного замедлителя нейтронов нового типа. Его отличительной особенностью является использование в качестве замедляющего материала смеси ароматических углеводородов: 70% мезитилена и 30% метаксиллола (температура плавления смеси 223 К). Приготовленные заранее твердые шарики замедлителя $\varnothing 3.5\text{--}3.8$ мм загружают в камеру при температуре ~ 30 К (рис. 1) методом пневмотранспорта в газовом потоке холодного гелия по криогенному трубопроводу. Использование данного материала в виде шариков в полной мере удовлетворяет перечисленным выше требованиям к замедлителям нейтронов.

Одной из основных проблем при создании такого замедлителя является обеспечение возможности эффективной загрузки шариков в камеру замедлителя по сложной системе криогенных трубопроводов через биологическую защиту реактора. При этом, с одной стороны, время заполнения камеры не должно быть слишком боль-



Рис. 1. Внешний вид шариков из смеси ароматических углеводородов, замороженных в жидком азоте.

шим, а с другой, скорость движения шариков по трубопроводу не должна быть слишком высокой во избежание их разрушения в процессе пневмотранспорта.

В данной работе описан полномасштабный испытательный стенд имитатора криогенного замедлителя со всеми технологическими системами, системами контроля и накопления и визуализации данных, расположенный вне радиационных полей. На стенде были проведены эксперименты по моделированию загрузки материала в камеру-имитатор замедлителя, опробованы различные режимы его работы и отработаны системы кон-

троля прохождения шариков по криогенным трубопроводам.

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ЗАМЕДЛИТЕЛЯ

Испытательный стенд криогенного шарикового замедлителя был собран в экспериментальном зале реактора ИБР-2 [10–12]. Он является полномасштабной копией системы криогенного замедлителя и отличается лишь ориентацией трубопровода в пространстве. Схема стенда приведена на рис. 2. В состав стенда входят криогенная гелиевая установка (КГУ) с трубопроводами подвода/отвода гелия; криостат с встроенным в него теплообменником, криогенным гелиевым насосом и криогенными вентилями; криогенный пневмотранспортный трубопровод шариков (пневмотрасса); дозатор; камера-имитатор замедлителя.

Полная длина пневмотрассы от дозатора до камеры составляет 18 м. Пневмотрасса внутренним диаметром 16 мм окружена снаружи экранно-вакуумной изоляцией, ограничивающей приток тепла на уровне 3 Вт/м при вакууме в изолирующем объеме $\sim 10^{-3}$ Па. Для обеспечения циркуляции холодного газа по контуру используется криогенный гелиевый насос. Максимальный расход гелия с температурой 30–40 К составляет до 4–5 г/с при разности давлений вдоль контура не выше 7 кПа. Для измерения температуры стенок труб и дозатора используются резистивные датчики ТВО

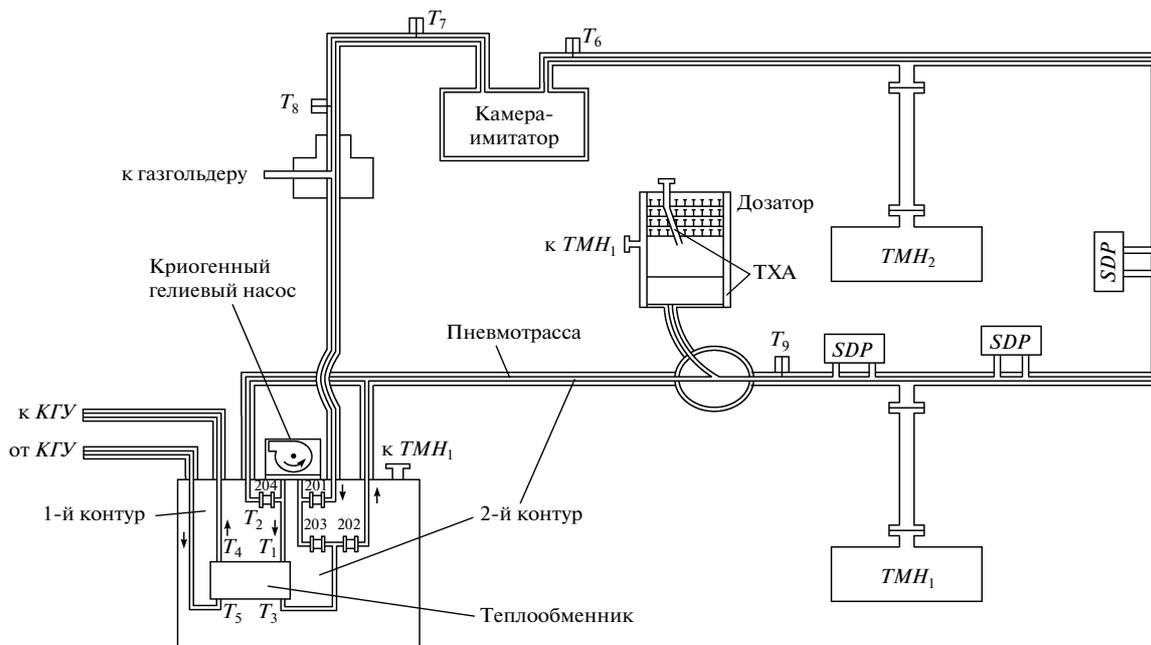


Рис. 2. Схема стенда шарикового криогенного замедлителя нейтронов. ТМН – турбомолекулярные вакуумные насосы; SDP – датчики дифференциального давления DXLdp; ТХА – термопреобразователь хромель-алюмелевый; T – резистивные датчики температуры ТВО; вентили 201–204 регулируют движение гелия в криостате.

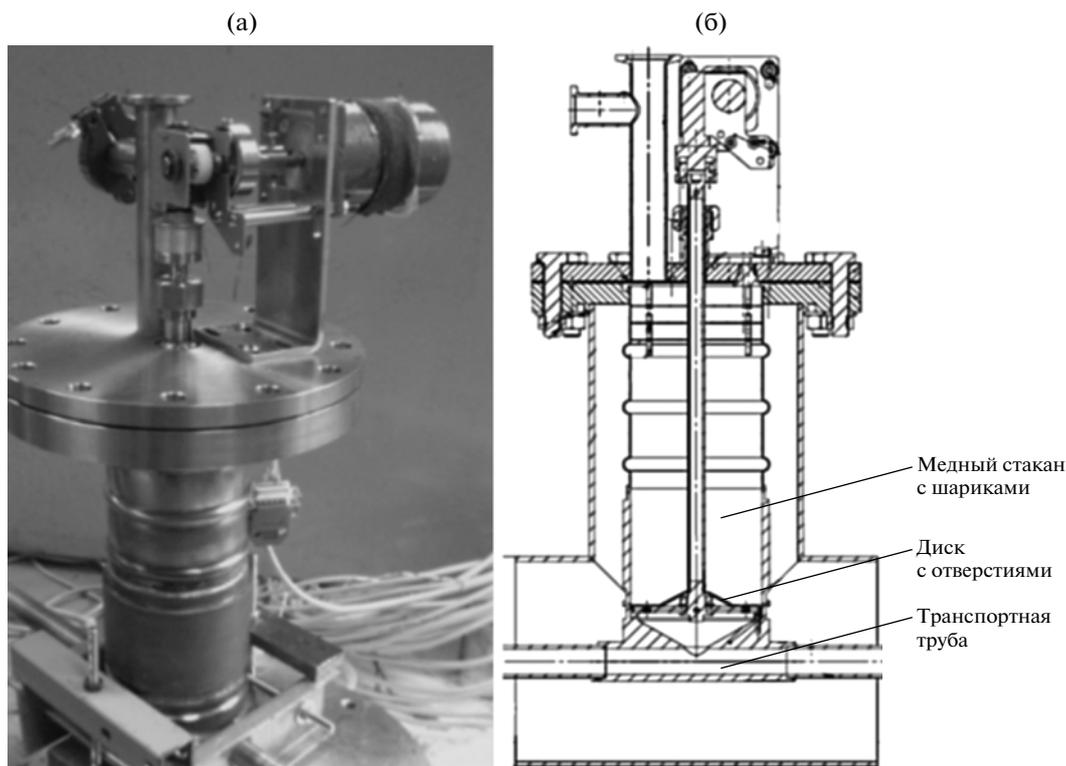


Рис. 3. Дозатор: а – медный стакан с шариками, б – схема дозатора.

($T_1 - T_9$) и термопреобразователи хромель-алюмелевые ТХА (рис. 2). Расход гелия измеряется и дифференциальными манометрами как мембранного, так и калориметрического типа.

Процесс загрузки шариков в камеру-имитатор начинают после достижения рабочих температур $T \sim 80$ К во всех основных узлах и системах 1-го и 2-го контуров. Охлаждение 1-го контура до низких температур обеспечивается циркуляцией гелия по трубопроводам от КГУ к теплообменнику и обратно. Второй контур – пневмотрасса, включающая дозатор и камеру-имитатор.

Первый и второй контуры связаны между собой теплообменником, что обеспечивает поддержание режима низких температур и во втором контуре. Для изоляции от внешних источников тепла трубопроводы 1-го и 2-го контуров заключены в вакуумные кожухи.

Приготовленные заранее замороженные шарики замедлителя порциями помещают в дозатор (рис. 3). Из него они порциями по несколько штук переносятся во внутреннюю трубу пневмотрассы. Поскольку объем дозатора не превышает 350 см^3 , а объем камеры замедлителя 1 л, то загрузка камеры шариками из дозатора была разделена на 3 этапа – 2 этапа по 330 см^3 шариков и один этап 340 см^3 . Наиболее надежным устройством дозирования шариков оказался вращающийся диск с несколькими отверстиями диамет-

ром 4 мм, т.е. несколько большим диаметра шариков. Диск располагается на дне дозатора. Шарики поступают в трубопровод через отверстия только при прерывистом вращении диска. Благодаря изготовленной из меди нижней части дозатора (объем хранения шариков $\sim 350 \text{ см}^3$), соединенной с криогенным трубопроводом, поддерживается низкая температура в дозаторе. Измеренный градиент температур между трубопроводом и верхней точкой медного стакана составляет ~ 9 К. Выбранные размеры дозатора обуславливаются минимизацией возможных теплопритоков из окружающей среды, поступающих к нему, а размеры камеры – расположением нейтронных реакторов ИБР-2 и требованиями по запасу прочности.

Потоком холодного гелия шарики транспортируются к камере-имитатору объемом $18 \times 18 \times 4 \text{ см}^3$, которая установлена в вакуумном кожухе (рис. 4). Ее габаритные размеры в точности повторяют камеру спроектированного криогенного замедлителя реактора ИБР-2.

Замороженные шарики, двигаясь в потоке циркулирующего по контуру холодного гелия, поступают в камеру-имитатор, задерживаются на ее решетке и постепенно заполняют камеру. За процессом загрузки можно наблюдать с помощью установленной снаружи веб-камеры через окна-вставки, состоящие из трех стекол, два из которых толщиной по 10 мм изготовлены из кварца.

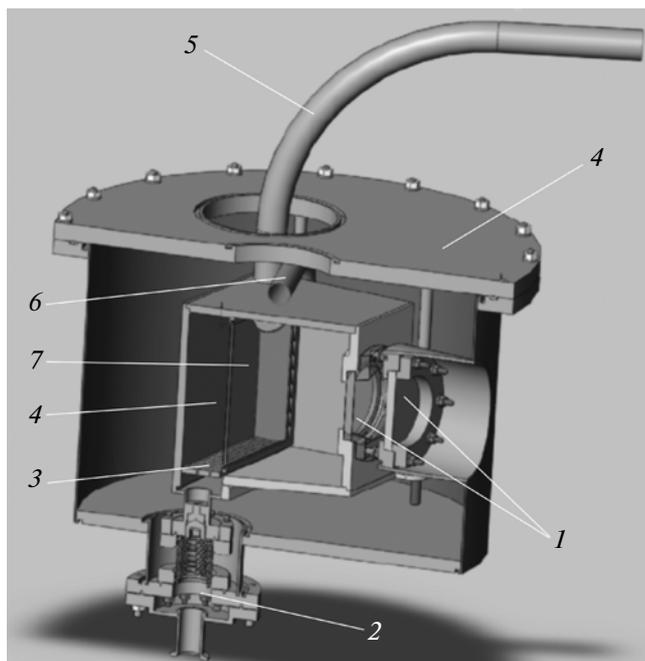


Рис. 4. Трехмерное изображение камеры-имитатора (в разрезе). 1 – стеклянные окна; 2 – дренажная система; 3 – решетка; 4 – камера-имитатор; 5 – трубопровод подвода гелия и шариков; 6 – трубопровод отвода гелия; 7 – стеклянная стенка камеры-имитатора.

Движение шариков по трассе фиксируется датчиками дифференциального давления (*SDP* на схеме рис. 2).

После окончания загрузки камеры-имитатора стенда криогенную гелиевую установку останавливают, затем выключают систему продувки газа и вакуумные насосы. Это приводит к отогреву обоих контуров и плавлению шариков твердой смеси. Расплавленная смесь удаляется из камеры через специальную дренажную систему. Затем стенд можно подготавливать к повторению экспериментов.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ РАБОТЫ СТЕНДА

Системы управления и контроля работы стенда замедлителя были созданы с учетом возможности их дальнейшего использования при работе с штатным замедлителем. Все модули системы объединены в единый блок управления (рис. 5), расположенный в экспериментальном зале, а управление и сбор данных осуществляются дистанционно с помощью персонального компьютера (*ПК*) и специально созданного программного обеспечения.

Система управления и контроля содержит следующие модули: контроля температуры; управления двигателем газодувки; управления двигате-

лем дозирующего устройства; контроля движения шариков; управления веб-камерой.

Модуль контроля температуры. Для контроля температуры используется комплекс из 8-ми установленных вдоль трассы датчиков ТВО и трех термопар ТХА. Диапазон измеряемых температур составляет 15–273 К. Сопротивления датчиков ТВО в диапазоне изменяются от 1.8 кОм до 800 Ом. С повышением температуры сопротивления угольных резисторов уменьшаются. Требуемая точность измерения температуры 0.1 К. Датчики подключены по четырехпроводной схеме. Для регистрации показаний датчиков используется 8-канальный измеритель аналоговых сигналов ТМ 5103 (термометр многоканальный), который работает в циклическом режиме, проводя последовательно измерения по всем 8-ми каналам. Измерительные каналы ТМ предназначены для работы с унифицированными входными электрическими сигналами постоянного тока 0–5, 0–20 или 4–20 мА, а также для измерения постоянного напряжения в диапазоне до 100 мВ и сопротивления до 320 Ом при измерениях на постоянном токе. Измеритель ТМ 5103 снабжен интерфейсом связи с *ПК* по линии RS232, что позволяет подключать его к удаленному *ПК* по линии связи длиной до 15 м. Это облегчает контроль температурных режимов во внутренней трубе пневмотрассы.

Термопары ТХА подключены к двадцатиканальному мультиметру фирмы Kethly. Погрешность измерения постоянного напряжения в милливольтном диапазоне составляет 0.005%. Мультиметр позволяет проводить измерения сопротивления по четырехпроводной схеме, кроме того, он снабжен интерфейсом для связи с *ПК*.

Модуль управления криогенным гелиевым насосом. Скорость движения газообразного гелия во внутренней трубе пневмотрассы определяется частотой вращения вала насоса (до 24000 оборотов/мин) и плотностью (температурой) газа. Приводом вала насоса BNHeP фирмы Barber Nicols (США) служит шаговый двигатель с контроллером VF-S11 фирмы Toshiba для двигателей мощностью до 400 Вт.

Модуль управления двигателем дозатора. Программа управления вращением шагового двигателя диска дозатора была оптимизирована таким образом, чтобы обеспечить нужную скорость выброса шариков и избежать заторов перед местом подъема трассы. Для системы управления шаговым двигателем дозатора шариков был выбран контроллер управления фирмы Standa: 8SMC1-USBh-B1. Он обеспечивает работу двигателя как в режиме непрерывного, так и в режиме прерывистого вращательного движения с определенным выбранным шагом и интервалом простоя между шагами. Управление и контроль параметров работы, таких как положение, ускорение/замедление, скорость и направление движения, осу-

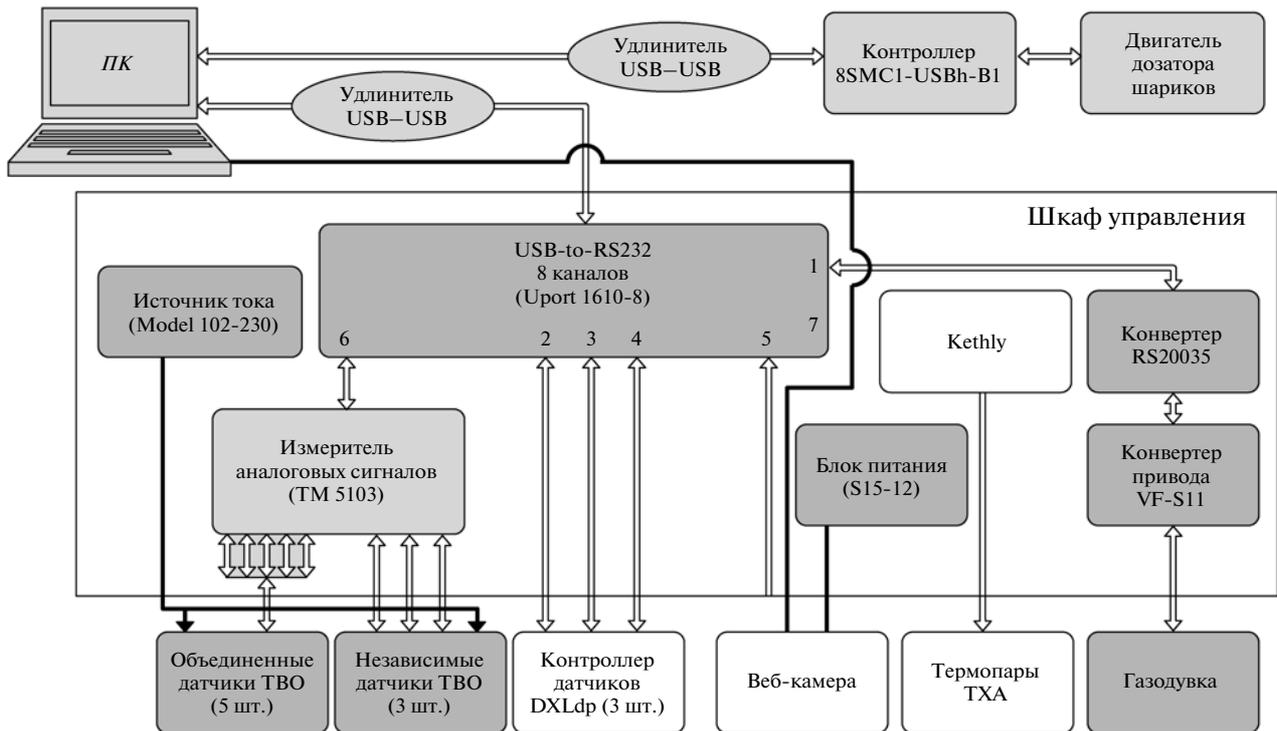


Рис. 5. Архитектура системы управления и контроля испытательного стенда криогенного замедлителя.

связываются с персональным компьютером через USB-интерфейс.

Модуль управления веб-камерой. Для контроля заполнения камеры испытательного стенда используется веб-камера Philips SPC2050NC, с максимальной частотой кадров 90 Гц и с внешней светодиодной подсветкой. Веб-камера установлена перед окном вакуумного кожуха камеры-имитатора. Она фиксирует попадание шариков

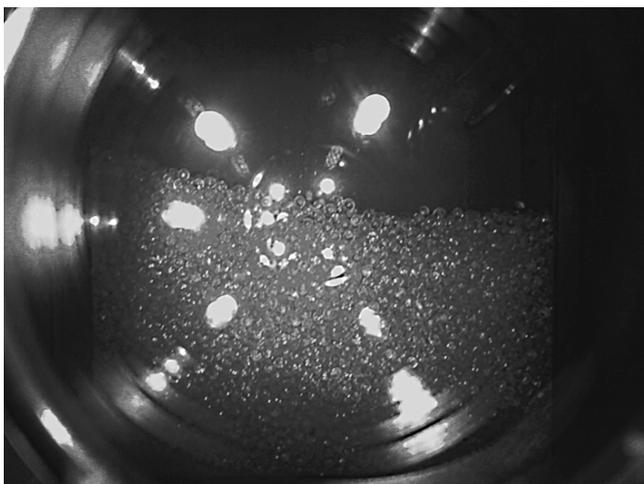


Рис. 6. Снимок, сделанный веб-камерой во время проведения эксперимента. Температура внутри камеры 80 К, загружено ~15000 шариков.

внутри камеры-имитатора (рис. 4) и передает изображение на компьютер через USB-удлинитель. Это позволяет наблюдать за процессом загрузки шариков в режиме реального времени (рис. 6).

Следует отметить, что в реальных условиях визуальное наблюдение за заполнением камеры шариками в замедлителе, установленном возле активной зоны реактора, будет невозможно. Поэтому очень важно предварительно отработать основные режимы загрузки камеры-имитатора криогенного замедлителя на испытательном стенде.

Модуль контроля за движением шариков. Принцип регистрации движения шариков основан на изменении разности статических давлений газа на концах измеряемого участка трубы при нахождении в нем шарика. В системе использованы три дифференциальных мембранных датчика низкого давления DXLdp фирмы ASHCROFT (США) (*SDP* на рис. 2). Диапазоны измерения разности давлений 0–25 и 0–100 Па, погрешность датчиков 0.5%, время отклика 10 и 200 мс. Мембранные датчики соединены с аналого-цифровым преобразователем LA-20USB последовательного приближения. Этот преобразователь поддерживает режимы передачи данных USB 2.0 для связи с ПК. Для сбора и обработки данных на ПК установлена специальная лицензированная программа, отображающая перемещение шариков по участкам

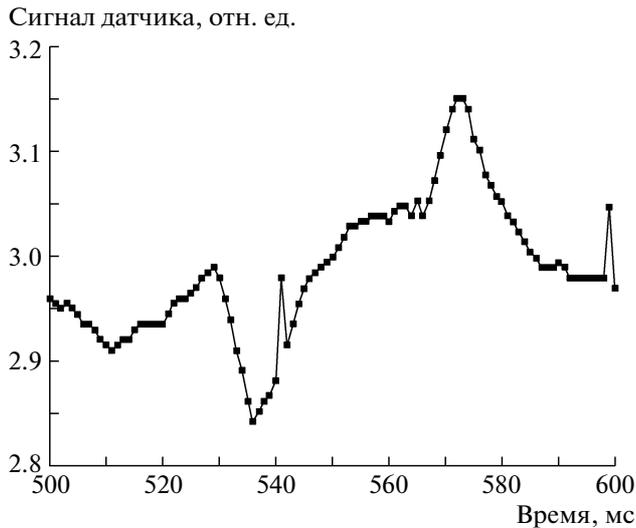


Рис. 7. Отклик датчика дифференциального давления на проход одиночного шарика. Короткие 1-мс пики — сигнал наводки на датчик от шагового двигателя (аналоговый сигнал датчика оцифрован платой ЛА-20USB с тактовой частотой 1000 Гц). Место регистрации — между T_0 и TMH_1 .

пневмотрассы в виде графических зависимостей перепадов давления от времени.

Движение шариков по трассе регистрировали в трех местах: сразу при попадании шарика в пневмотракт из дозатора, перед началом подъема трассы вверх под углом 30° и на горизонтальном участке на расстоянии 10 м от дозатора (полная длина трассы до камеры-имитатора 18 м). На первом участке длиной 5 см, когда скорость шариков еще мала (<1 м/с), сначала появляется короткий (10 мс) импульс отрицательной полярности, соответствующий возникновению области пониженного давления за шариком по ходу его движения. Амплитуда импульса $\sim 2-3$ Па. Затем следует длинный (50 мс) положительный импульс несколько меньшей амплитуды (рис. 7).

Наблюдение короткого отрицательного импульса позволяет приблизительно подсчитать число шариков, выброшенных в тракт (это число занижено примерно на 5%, поскольку выброс шариков из дозатора не строго периодичен — некоторые шарики выпадают с интервалом <10 мс при средней скорости выброса 6–8 штук/с). Измерения отношения перепадов статического давления на участках длиной по 0.6 м в двух других местах трассы позволяют определить, в дополнение к факту прохождения шариков по этим участкам, образование затора шариков на участке подъема трассы. Необходимость измерения перепада давлений в двух удаленных точках диктуется наличием значительного (порядка 1 Па) шума из-за флуктуаций скорости течения газа. Указанные выше процедуры контроля движения шариков

осуществляются специальной программой ПК с визуализацией текущих параметров на дисплее, которая генерирует также предупреждающие сигналы и записывает информацию в соответствующие файлы.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НА СТЕНДЕ

На испытательном стенде криогенного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2 было проведено более 40 экспериментов, в которых была продемонстрирована возможность надежной и быстрой загрузки шариков из ароматических углеводородов в камеру-имитатор по протяженному трубопроводу сложной геометрии, выработан оптимальный режим загрузки, отработаны технологические и измерительные системы. Проведено шесть полных загрузок камеры-имитатора за время в диапазоне 1–3 ч.

В ходе экспериментов на стенде был выбран оптимальный режим работы замедлителя:

1. Максимально допустимая скорость течения газообразного гелия во внутренней трубе не должна превышать 14 м/с, при этом средняя скорость шариков составляет 2.5–3 м/с.

Превышение максимально допустимой скорости течения гелия приводит к разрушению шариков на крутых поворотах трассы при контакте с трубой под углом, близким к 90° . Образующиеся при этом мелкие частицы и пыль будут попадать в камеру замедлителя. Это может приводить к увеличению гидравлического сопротивления трубопровода, которое обратно пропорционально размеру шариков, что в свою очередь приведет к снижению расхода и повышению температуры транспортирующего газа. В результате возрастет и температура шариков, что в конечном итоге приведет к повышению температуры замедлителя и уменьшению выхода холодных нейтронов с его поверхности [13].

2. Максимально допустимая плотность потока шариков на выходе из дозатора не должна превышать 8 штук/с.

Превышение максимально допустимой плотности приведет к возникновению неустраняемых заторов во внутренней транспортной трубе на участке перед подъемом трассы под углом 30° . При этом дальнейшая загрузка камеры замедлителя будет возможна лишь после полного отогрева системы и подготовки ее к работе (процедура занимает от 3 до 5 дней) при неработающем реакторе.

3. Максимально допустимая температура потока транспортирующего газа при загрузке шариков не должна превышать 85 К.

В случае загрузки замедлителя на работающем реакторе при более высоких температурах газа нельзя исключить слипание шариков в камере,

что может значительно снизить гидравлическое сопротивление течению гелия. В то же время при заметно более низкой температуре потока примесь азота может попасть в пневмотракт, сконденсироваться и забить медные трубки малого сечения, из которых состоит теплообменник в криостате. В результате уменьшается расход гелия и система отогревается. Для сохранения на заданном уровне газодинамической силы, действующей на шарик, скорость течения газа должна соответствовать выбранной температуре, т.е. должно выполняться соотношение

$$\rho(T)v^2 \cong 100-120 \text{ Па},$$

где ρ , кг/м³ – плотность газа при температуре T (для гелия ${}^4\text{He}$ $\rho \approx 56/T$); v , м/с – средняя по сечению трубы скорость газа. Кроме того, следует учитывать наличие важного для надежной эксплуатации трубопровода параметра – во избежание прилипания шариков замедлителя к поверхности стальной трубы температура стенок должна быть ниже 150–160 К. К тому же ранее из лабораторных опытов стало известно, что твердый мезитилен становится пластичным при нагреве выше 120–130 К. Это соответствует общепринятой концепции для молекулярных кристаллов $T_{\text{пласт}} \approx 0.6T_{\text{плав}}$.

По окончании загрузки камеры криогенная гелиевая машина КГУ-700 позволит охлаждать камеру замедлителя до рабочей температуры 30 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты по моделированию работы системы заполнения камеры замедлителя нейтронов на полномасштабном испытательном стенде позволяют решать проблему обеспечения загрузки шариков в камеру по сложной системе криогенных трубопроводов. В экспериментах на стенде доказана работоспособность принятого пневматического способа загрузки шариков в замедлитель. Кроме того, обоснован и выбран режим загрузки камеры криогенного замедлителя, который позволит проводить полную загрузку за 1–1.5 ч при скорости течения и температуре гелия 14 м/с и 85 К соответственно и плотности потока шариков на выходе из дозатора 8 штук/с.

Испытательный стенд позволил провести разработку архитектуры управления и контроля всех

систем криогенного замедлителя, которая послужит основой для систем криогенного замедлителя реактора ИБР-2.

Полученные данные позволяют приступить к монтажу криогенного замедлителя и всех его систем на реакторе ИБР-2.

Работа выполнена при поддержке МАГАТЭ (контракт IAEA F1-RC-1056.2 (F1.20.21) и Минобрнауки РФ (госконтракт 740.11.0533).

Коллектив авторов благодарен сотрудникам криогенно-вакуумной группы Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ за обеспечение бесперебойной подачи холодного гелия на испытательный стенд шарикового криогенного замедлителя нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов В.Л. // ЭЧАЯ. 2000. Т. 31. Вып. 6. С. 1303.
2. Балагуров А.М., Бескровный А.И., Миронова Г.М. и др. Сообщение ОИЯИ Р3-2000-220. Дубна, 2000.
3. Carpenter J.M., Schulke A.W., Scott T.L. et al. // Proceedings of International Collaboration on Advanced Neutron Sources VIII. RAL 85-110. 1985. V. 1. P. 311.
4. Utsuro M., Sugimoto M. // J. Nucl. Sci. and Technol. 1977. V. 14. P. 390.
5. Clark D.D., Ouellet C.G., Berg J.S. // Nucl. Sci. and Eng. 1992. V. 110. P. 445.
6. Ishikawa Y., Ikeda S., Watanabe N. et al. // Proc. of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-VII). 13–16 September 1983, Chalk River, Canada. 1983. V. II. P. 230.
7. Kiyonagi Y. // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. 562. Issue 2. P. 561.
8. Nuenighoff K., Pohl Ch., Koulikov S. et al. // European Physical Journal A – Hadrons and Nuclei. ISSN: 1434-6001, eISSN: 1434-601X. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. V. 38. P. 115.
9. Шабалин Е.П. // ЭЧАЯ. 2005. Т. 36. Вып. 6. С. 1425.
10. Булавин М.В., Кулагин Е.Н., Куликов С.А. и др. Сообщение ОИЯИ Р13-2009-72. Дубна, 2009.
11. Kulikov S., Shabalin E. // Rom. J. of Phys. (Bucharest). 2009. V. 54. № 3–4. P. 361.
12. Shabalin E., Kulikov S. // Neutron News. 2011. V. 22. Issue 2. P. 28.
13. Inoue K., Kiyonagi Y., Iwasa H. // Nucl. Instrum. and Methods. 1982. V. 192. P. 129.