

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ЗАГРУЗКИ КАМЕРЫ ШАРИКОВОГО
ХОЛОДНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ
ЦЕНТРАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ПУЧКОВ № 1, 4–6 И 9 РЕАКТОРА ИБР-2**

*А. А. Беляков, М. В. Булавин¹, А. Е. Верхоглядов, В. А. Скуратов,
И. А. Смелянский, С. А. Куликов, А. А. Кустов, К. А. Мухин,
А. А. Любимцев, А. П. Сиротин, В. К. Широков, Т. Б. Петухова*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приведены результаты экспериментов на испытательном стенде холодного замедлителя в направлении пучков № 1, 4–6 и 9 по исследованию принципиальной возможности загрузки его камеры замороженными шариками диаметром 3,5–3,8 мм по криогенному трубопроводу сложной конфигурации с участком подъема на угол 50° и длиной 4 м. Определены следующие оптимальные параметры, требуемые для успешной загрузки камеры замедлителя: массовый расход транспортирующего газа (гелия) 2 г/с, температура стенок транспортного трубопровода и гелия 79–85 К, угловая скорость диска с шариками внутри специального дозирующего устройства $3,6^\circ/0,5$ с, скорость подачи шариков в трубопровод из дозатора 8 шт./с, максимальное время загрузки камеры 6 ч. В процессе создания стенда криостат заменен на новый криостат с двумя газодувками, необходимый для обеспечения низкой температуры в двух независимых контурах охлаждения (для двух холодных замедлителей либо для холодного замедлителя и испытательного стенда), а также модифицировано программное обеспечение для контроля параметров во время работы.

This paper presents the results of experiments performed on the test stand of the cold moderator for beams 1, 4–6, and 9. It studies the possibility of loading the moderator chamber with frozen pellets (beads) 3.5–3.8 mm in diameter through a cryogenic complex pipeline with a 4-m high section ascending at 50° . The following parameters required for an effective loading of the moderator chamber have been determined as optimal: the mass flow rate of the carrier gas (helium) — 2 g/s, the temperature of the pipe walls and helium — 79–85 K, the angular velocity of the dispenser disc containing pellets — $3.6^\circ/0.5$ s, the rate of pellet ejection from the dispenser into the pipe — 8 pcs/s, the maximum loading time — 6 h. In the process of the test stand construction, the old cryostat has been replaced with a new one, having two gas blowers and required to ensure low temperature in two independent cooling circuits (for two cold moderators or for a cold moderator and a test stand). In addition, the software controlling the operation parameters has been modified.

PACS: 07.05.Bx; 07.05.Dz; 07.20.Mc; 07.20.Dt; 07.30.-t; 07.07.Df

¹E-mail: bulavin85@inbox.ru

Работа посвящается памяти
Александра Андреевича Любимцева

ВВЕДЕНИЕ

В состав комплекса замедлителей модернизированного исследовательского реактора ИБР-2 (Дубна, Россия) помимо замедлителей на основе воды комнатной температуры входят три уникальных шариковых холодных замедлителя на основе смеси ароматических углеводородов мезитилена и м-ксилола, окружающих активную зону. Первый холодный замедлитель [1–5] имеет проектный номер К3202 и работает в режиме тестовой эксплуатации на физический эксперимент в направлении исследовательских пучков № 7, 8, 10 и 11 [6, 7], рис. 1. Остальные два замедлителя, которые будут располагаться в направлении пучков № 2, 3 и пучков № 1, 4–6, 9, в настоящее время находятся в стадии разработки.

Возможность бесперебойной загрузки рабочего вещества в виде замороженных шариков диаметром 3,5–3,8 мм из смеси ароматических углеводородов (мезитилена и м-ксилола) в камеру холодного замедлителя потоком гелия при температуре 30 К по криогенному транспортному трубопроводу сложной конфигурации была доказана сначала на специальном стенде [8, 9], а затем и во время эксплуатации замедлителя. За время тестовой эксплуатации шариковый холодный замедлитель безаварийно отработал 11 циклов на мощности реактора в 2 МВт. Максимальная длительность цикла работы замедлителя составляет 10,5 сут (510 МВт·ч).

Важным элементом холодного замедлителя, работающего в направлении исследовательских выведенных пучков № 1, 4–6 и 9 (замедлителя «центрального направления», проектный номер К3201) является криогенный транспортный трубопровод, который

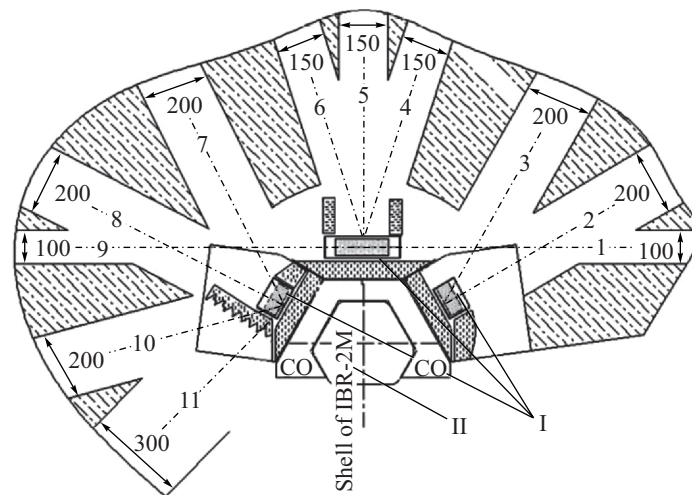


Рис. 1. Комплекс замедлителей модернизированного реактора ИБР-2. I — холодные замедлители: К3201 — в направлении пучков № 1, 4–6, 9, К3202 — в направлении пучков № 7, 8, 10, 11, К3203 — в направлении пучков 2, 3; II — активная зона реактора; CO — контролирующие органы реактора; 1–11 — нейтронные пучки

(в отличие от такого же трубопровода КЗ202) имеет большой угол подъема, равный 50° . Перепад высот между самой низкой и самой высокой точками трубопровода составляет 4 м. Данный участок подъема появился при проектировании замедлителя из-за особенностей геометрии реактора ИБР-2 и его биологической защиты.

Холодный замедлитель КЗ202 не имеет участков с такими большими углами подъема (максимальный угол подъема составляет 30° , а перепад высот всего 0,5 м). Поэтому для проверки возможности загрузки на угол подъема 50° и высоту 4 м был разработан и создан полномасштабный исследовательский стенд, полностью повторяющий размеры реального холодного замедлителя с участком подъема в масштабе 1:1.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА КЗ201 С УЧАСТКОМ ПОДЪЕМА. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ

С 2012 по 2015 г. тестовая эксплуатация холодного замедлителя КЗ202 осуществлялась с криостатом с одним гелиевым насосом (газодувкой), обеспечивающим охлаждение и транспорт шариков только в криогенном трубопроводе КЗ202. Однако по проекту комплекса замедлителей ИБР-2 эксплуатируемый КЗ202 и замедлитель в направлении пучков №2, 3 должны работать с общим криостатом и криогенной гелиевой установкой (КГУ) с возможностью эксплуатации в одновременном режиме охлаждения. Поскольку холодный замедлитель в направлении пучков №2, 3 (проектное обозначение КЗ203) находится в стадии разработки, криостат с одной газодувкой был заменен на криостат с двумя газодувками для замедлителя КЗ202 и испытательного стенда КЗ201.

3D-модель испытательного стенда с участком подъема приведена на рис. 2, технологическая схема — на рис. 3. Испытательный стенд имеет общий теплообменник с холодным замедлителем КЗ202, расположенный в криостате с двумя газодувками. Трубопроводы подвода гелия к камере-имитатору и отвода гелия от камеры-имитатора стенда и камеры замедлителя не соединены между собой и являются отдельными самостоятельными узлами. Охлаждение как замедлителя КЗ202, так и стенда КЗ201 осуществляется при помощи КГУ, которая производит гелий с температурой 20–25 К и подает его в теплообменник криостата по трубопроводам подвода и отвода гелия. Режим работы КГУ предусматривает как одновременное захлаживание замедлителя и стенда, так и охлаждение их по отдельности.

Криогенный транспортный трубопровод внутренним диаметром 16 мм имеет экранно-вакуумную изоляцию, обеспечивающую теплоприток на уровне 3 Вт/м при вакууме в изолирующем кожухе порядка 10^{-5} Торр. Показания вакуума контролируются при помощи вакуумных датчиков MicroPirani MKS 901 и MKS925 [6].

Гелиевые газодувки обеспечивают максимальный массовый расход гелия с температурой 30 К до 6 г/с при сопротивлении контура не выше 7 кПа. Значения температуры стенок труб, дозатора и камеры-имитатора регистрируются термодиодами типа DT670 и радиационно стойкими термопарами типа ТХА. Расход гелия измеряется трубкой Пито и преобразователями перепада низкого давления DXLdp, которые также фиксируют прохождение шариков по криогенному трубопроводу и образование в нем возможных заторов. Датчики установлены в двух местах: сразу на выходе из дозирующего устройства и перед участком подъема.

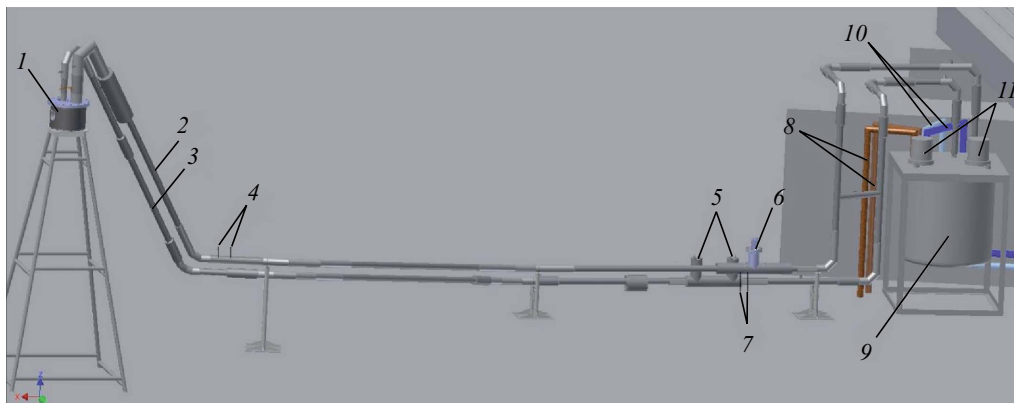


Рис. 2. 3D-модель испытательного стенда холодного замедлителя КЗ201 реактора ИБР-2: 1 — камера-имитатор в вакуумном цилиндрическом кожухе; 2 — трубопровод подвода гелия к камере-имитатору; 3 — трубопровод отвода гелия от камеры-имитатора; 4, 7 — выходы для датчиков дифференциального давления, отслеживающих движение шариков в трубопроводе; 5 — трубки Пито; 6 — дозирующее устройство; 8 — трубопроводы КГУ для подвода и отвода гелия; 9 — криостат с теплообменником; 10 — трубопроводы подвода и отвода гелия замедлителя КЗ202; 11 — гелиевые газодувки

Камера-имитатор стенда с криогенными трубопроводами образует первый контур охлаждения, а КГУ с криогенными трубопроводами — второй контур охлаждения.

Принцип работы испытательного стенда КЗ201 идентичен принципу работы холодного замедлителя КЗ202. После достижения температур во всех основных узлах и системах первого и второго контуров охлаждения $\approx 80\text{--}85\text{ К}$ начинается процесс загрузки шариков в камеру-имитатор. Значение температуры, при которой происходит загрузка, должно быть немного выше, чем температура замерзания жидкого азота, который из-за технологических особенностей изготовления шариков может попасть в пневмотрассу вместе с шариками. Загрузка при более низкой температуре может привести к его замерзанию в теплообменнике, которым связаны первый и второй контуры охлаждения, потере расхода в пневмотранспортном трубопроводе и, как следствие, к прекращению охлаждения. Охлаждение второго контура до низких температур обеспечивается циркуляцией гелия по трубопроводам от КГУ к теплообменнику и обратно. Охлаждение первого контура происходит за счет циркуляции в нем гелия и прохождения его через теплообменник, находящийся в криостате с вакуумной изоляцией. Постоянное давление внутри транспортного трубопровода составляет 1,01 атм и поддерживается при помощи газгольдера.

Заранее приготовленные замороженные шарики порциями по 250 мл помещают внутрь дозирующего устройства [8], из которого они периодически, порциями по несколько штук, попадают во внутреннюю трубу пневмотрассы.

Из дозатора потоком холодного гелия шарики транспортируются к камере-имитатору ($18 \times 18 \times 4\text{ см}$), установленной в вакуумном кожухе (рис. 4). Ее габаритные размеры в точности повторяют проектные размеры камеры холодного замедлителя реактора ИБР-2.

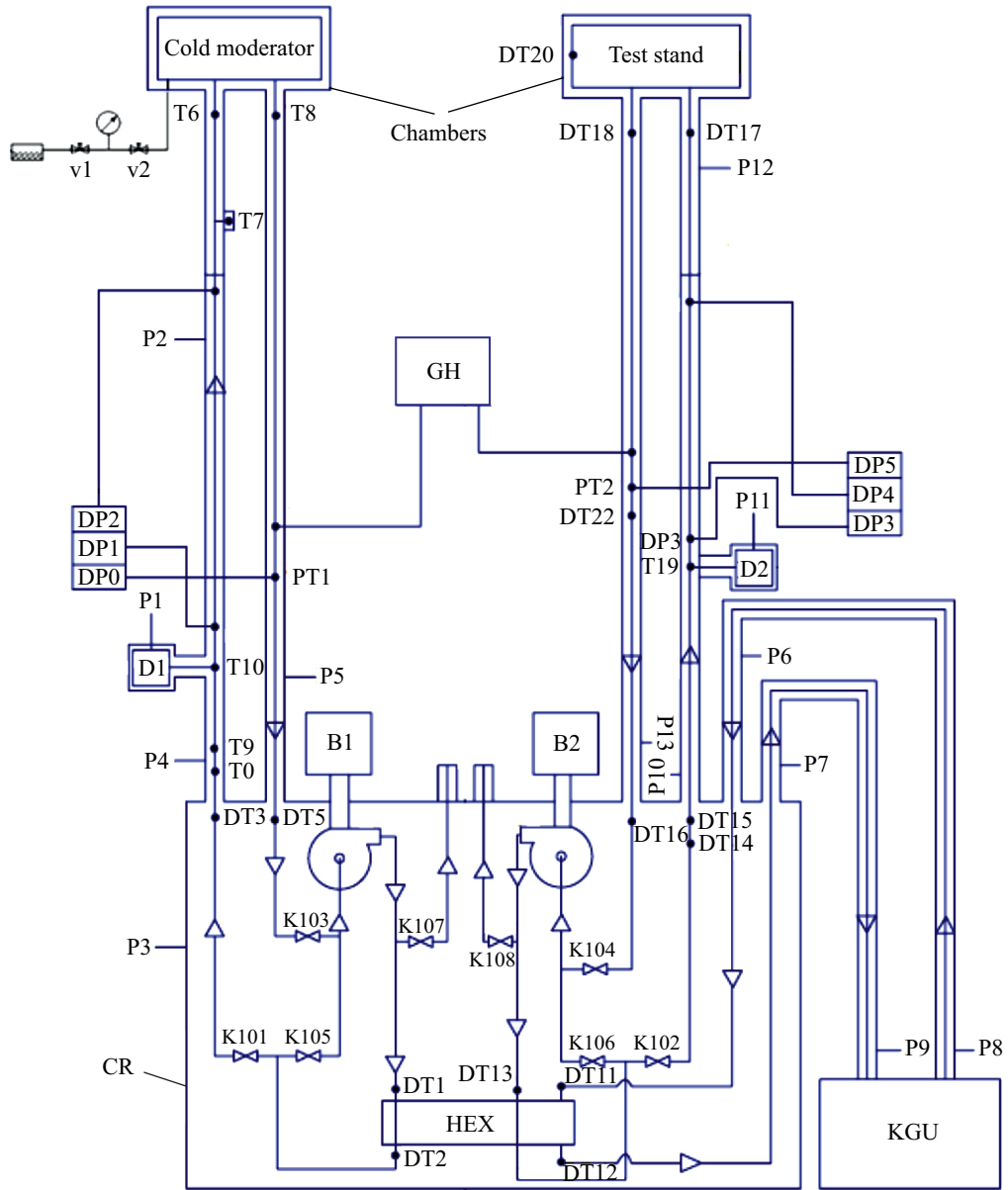


Рис. 3. Технологическая схема испытательного стенда K3201 и холодного замедлителя K3202 с двумя газодувками, общим теплообменником и КГУ. DT — датчики температуры, термодиоды DT670; T — радиационно стойкие термомпары типа ТХА; P — вакуумные датчики MicroPirani MKS 901 и MKS925; KГУ — криогенная гелиевая установка; B1 и B2 — газодувки; D1 и D2 — дозирующие устройства; DP — датчики дифференциального давления типа DXLdp; v1 и v2 — вентили для слива отработанной смеси мезитилена и метаксилола; GH — газгольдер; HEX — теплообменник; CR — криостат

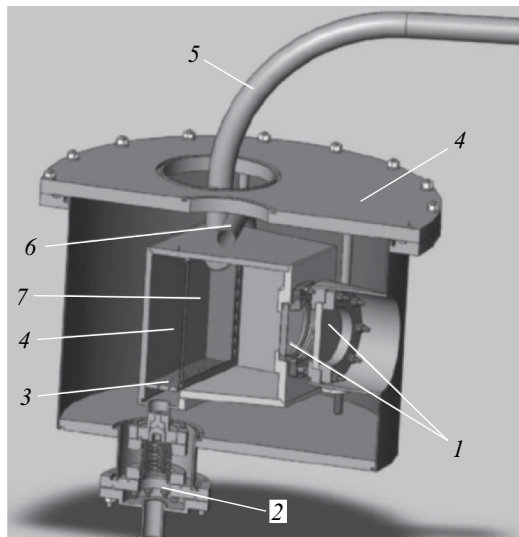


Рис. 4. Трехмерное изображение камеры-имитатора (разрез): 1 — стеклянные вставки; 2 — дренажная система; 3 — решетка; 4 — камера-имитатор; 5 — трубопровод подвода гелия и шариков; 6 — трубопровод отвода гелия; 7 — стеклянная стенка камеры-имитатора

Замороженные шарики поступают в камеру-имитатор и, задерживаясь на ее решетке, постепенно заполняют камеру. При этом процесс загрузки можно наблюдать при помощи установленной снаружи видеокamеры через специальные окна, состоящие их трех стекол, два из которых — кварцевые толщиной 10 мм.

После окончания загрузки камеры-имитатора стенда останавливают криогенную гелиевую установку (КГУ), выключают газодувку и вакуумные насосы, что приводит к отогреву первого и второго контуров охлаждения и расплавлению шариков.

Расплавленная смесь удаляется из камеры через специальную дренажную систему, после чего стенд подготавливают к повторному проведению экспериментов.

Система контроля параметров работы, разработанная для холодного замедлителя К3202 с криостатом и одной газодувкой [6], была модифицирована для криостата с двумя газодувками для стенда и замедлителя. Новая система управления и контроля основана на компьютерной программе Cold Moderator или СМ. Она разделена на три части, каждая из которых отвечает за прием и обработку информации с КГУ (КГУ_Viewer, рис. 5), стенда К3201 (СМ_201) и замедлителя К3202 (СМ_202). Каждая программа имеет свой конфигурационный файл, определяющий, какую информацию о параметрах работы необходимо извлечь. При этом информация о параметрах КГУ (программа КГУ_Viewer) отображается также и в программах СМ_201 и СМ_202.

Программа СМ_201 идентична программе СМ_202 и представляет собой мнемосхему (рис. 6) на основе технологической схемы. В ней представлена информация о давлении, температуре, расходе гелия, количестве гелия в газгольдере и частоте вращения вала газодувки. Вся информация записывается в файлы для просмотра и анализа. Аварийные ситуации, такие как потеря расхода газа, рост температуры, изменение давления и т. п. сопровождаются светозвуковой сигнализацией.

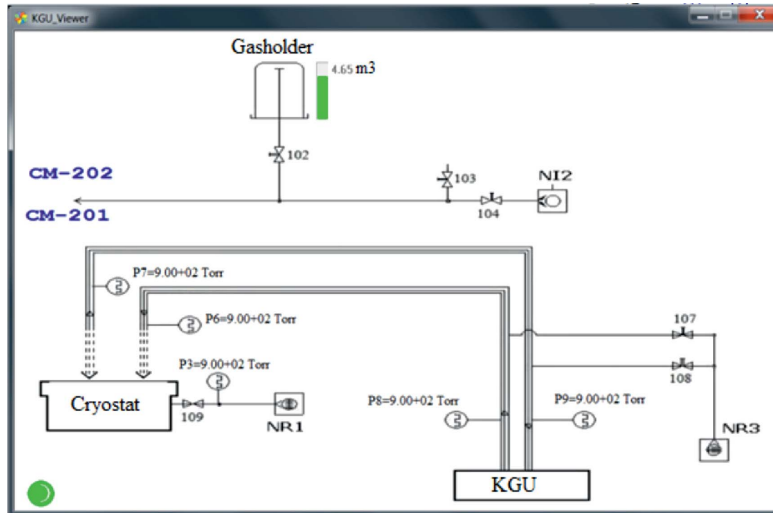


Рис. 5. Компьютерная программа KGU_Viewer испытательного стенда K3201

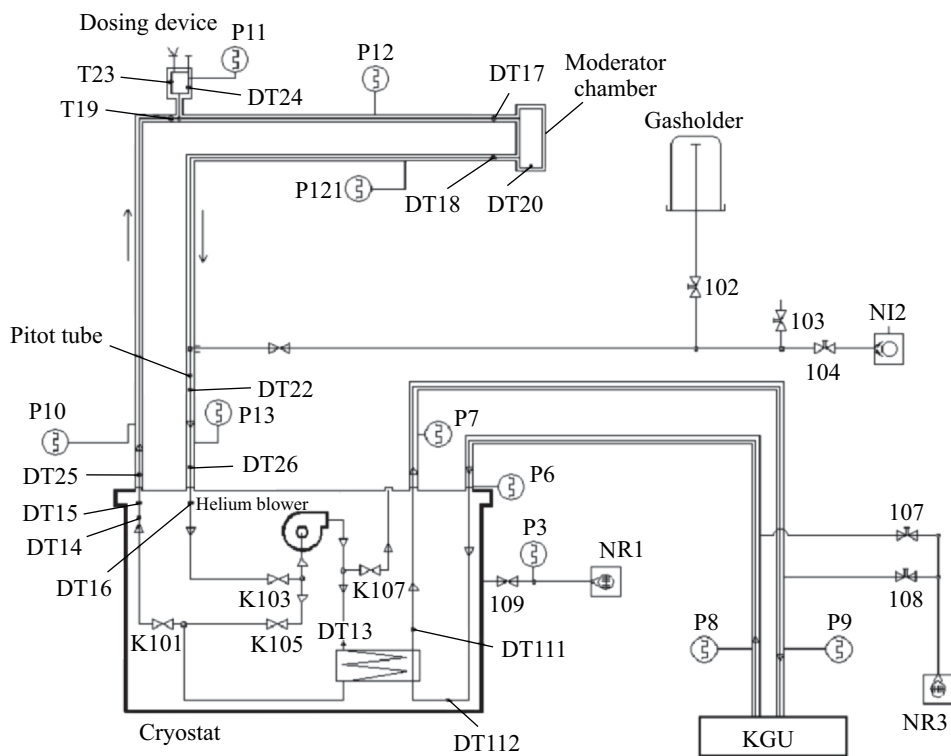


Рис. 6. Мнемосхема компьютерной программы CM_201 на основе технологической схемы испытательного стенда

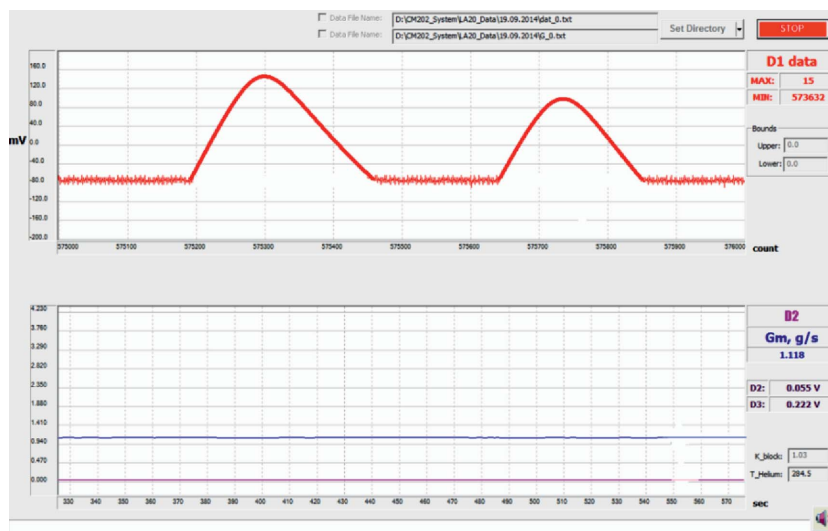


Рис. 7. Программа Balls movement control (BMC) испытательного стенда К3201. В верхней части рисунка видны максимумы, возникающие во время прохождения шариков, Gm — расход гелия

Программа Balls movement control (BMC) отображает движение шариков по пневмотрассе в виде графических максимумов и обеспечивает визуализацию текущих параметров на дисплее, генерацию предупреждающих сигналов и запись информации в файлы (рис. 7). В случае возникновения затора из шариков расход гелия (Gm) в системе падает, и программа выдает предупреждающий светозвуковой сигнал.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На стенде были проведены эксперименты по исследованию возможности загрузки камеры-имитатора замедлителя, определены оптимальные параметры во время загрузки шариков, такие как температура криогенных трубопроводов, давление, массовый расход транспортирующего газа (гелия) и скорость выброса шариков из дозирующего устройства, определяющая время загрузки камеры. Также был испытан режим одновременного охлаждения замедлителя и стенда с имеющейся криогенной гелиевой машиной КГУ700/15 мощностью 700 Вт.

На испытательном стенде холодного замедлителя К3201 были проведены 3 эксперимента по загрузке камеры-имитатора замороженными шариками в количестве до 500 мл (1/2 камеры). Во всех трех экспериментах все шарики из дозирующего устройства были загружены в камеру-имитатор с успешным преодолением подъема. Загруженные шарики в камере показаны на рис. 8.

Эксперименты по одновременному захолаживанию стенда и замедлителя показали, что средние минимальные температуры камеры замедлителя и камеры-имитатора стенда, которых удалось достичь при помощи используемой криогенной машины КГУ700/15, составили 60 К, тогда как проектное значение температуры камеры замедлителя составляет 30 К.



Рис. 8. Замороженные шарики, загруженные в камеру-имитатор испытательного стенда К3201

Эксперименты на стенде с участком подъема позволили определить следующие рабочие параметры для загрузки шариков в камеру-имитатор стенда.

1. Температура внутри криогенного транспортного трубопровода первого контура охлаждения стенда при загрузке шариков должна находиться на уровне 79–85 К. Режим низкой температуры в криогенном транспортном трубопроводе поддерживается за счет получения вакуума в изолирующем пространстве на уровне 10^{-5} Торр.

2. Минимальный массовый расход гелия во время пневмотранспорта не должен быть меньше 2 г/с при частоте вращения вала газодувки 375 Гц. Установленный максимальный расход гелия составляет 6 г/с. Избыточное давление в трубопроводе при данном расходе составляет 780–790 Торр.

3. Режим загрузки шариков в трубопровод был выбран таким образом, чтобы, с одной стороны, время загрузки было минимальным, а с другой — у подъема трубопровода стенда не возникало заторов. Наименьшее время загрузки достигается путем шагового вращения диска дозатора шаговым двигателем в импульсном режиме с угловой скоростью $3,6^\circ$ за 0,5 с. Время между импульсами составляет также 0,5 с. По мере уменьшения количества шариков в дозаторе угловая скорость увеличивается в 2–3 раза. С такой угловой скоростью полная выгрузка одной партии шариков из дозатора объемом 250–350 мл происходит за время 1,5–2 ч. Скорость высыпания шариков из дозатора при этом составляет 8 шт./с.

Все полученные на испытательном стенде параметры соответствуют рабочим параметрам холодного замедлителя К3202, зафиксированным во время тестовой эксплуатации замедлителя. В режиме одновременного захолаживания замедлителя и стенда (а в будущем и двух замедлителей К3202 и К3203) не удастся достичь необходимой для работы температуры камеры в 30 К. Это объясняется малой холодопроизводительностью криогенной гелиевой машины КГУ700/15. Поэтому в процесс реализации проекта по созданию комплекса холодных замедлителей КГУ700/15 будет работать на охлаждение только замедлителя К3201, а для замедлителей К3202 и К3203 будет приобретена новая криогенная установка Refrigerator 1200/10 фирмы Linde мощностью 1200 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты по моделированию на испытательном стенде холодного замедлителя КЗ201 реактора ИБР-2 доказали возможность загрузки замороженных шариков из смеси мезитилена и м-ксилола в камеру по сложному криогенному трубопроводу с участком подъема на угол 50° и высоту 4 м, а также позволили отработать методику проведения таких экспериментов. Обоснован и выбран режим загрузки камеры холодного замедлителя, который позволяет производить полную загрузку камеры замедлителя за время около 4–5 ч при массовом расходе гелия и его температуре 2 г/с и 79–85 К соответственно. Угловая скорость вращения диска дозирующего устройства составляет $3,6^\circ$ за 0,5 с. Диск движется в режиме прерывистого движения. Скорость подачи шариков из дозирующего устройства в криогенный трубопровод при данной угловой скорости составляет около 8 шт./с.

Результаты исследования на стенде, а также разработанная на его основе архитектура управления и контроля всех систем холодного замедлителя позволяет, во-первых, успешно эксплуатировать замедлитель «центрального направления» КЗ201 с криогенной гелиевой машиной КГУ700/15 и, во-вторых, эксплуатировать криостат с двумя газодувками и работающие на его основе холодные замедлители в режиме либо одновременного, либо раздельного охлаждения с криогенной гелиевой установкой Refrigerator 1200/10.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bulavin M. et al.* Recent Progress in Development of the Pelletized Cold Neutron Moderators for the IBR-2M Reactor // 19th Meeting on Collaboration of Advanced Neutron Sources, Grindelwald, 2010. P. 1–8.
2. *Beliakov A. et al.* Current Status of Development Advanced Pelletized Cold Moderators for the IBR-2M Research Reactor // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10, No. 2. P. 230–235.
3. *Ананьев В. Д. и др.* Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2 // ЖТФ. 2014. Т. 84, №2. С. 131–134.
4. *Ананьев В. Д. и др.* Первый в мире шариковый холодный замедлитель нейтронов. Сообщ. ОИЯИ Р13-2012-113. Дубна, 2012. 14 с.
5. *Bulavin M. et al.* The World's First Pelletized Cold Neutron Moderator at a Neutron Scattering Facility // Nucl. Instr. Meth. B. 2014. V. 320. P. 70–74.
6. *Belyakov A. A. et al.* Control System of Pelletized Cold Neutron Moderator of the IBR-2 Reactor // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 6. P. 773–777.
7. *Bulavin M. V. et al.* Application of a Cryogenic Moderator in the REMUR Neutron Reflectometer // J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. V. 10, No. 1. P. 1–9.
8. *Ананьев В. Д. и др.* Испытательный стенд шарикового криогенного замедлителя нейтронов реактора ИБР-2 // ПТЭ. 2013. № 1. С. 128–134.
9. *Ananiev V. D. et al.* Test Stand of the Technological System of the Cryogenic Moderator with the Control Electronics // Rom. J. of Science and Arts. 2011. No. 3. P. 339–346.

Получено 15 января 2016 г.