

УДК 54.062:54.084:543.544.33:544.541

КОНЦЕПЦИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА КРИОГЕННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

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

^aОбъединенный институт ядерных исследований, Московская область, Дубна, 141980 Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^cИнститут ядерной физики, Алматы, 050032 Казахстан

*e-mail: bulavin85@inbox.ru

Поступила в редакцию 09.01.2022 г.

После доработки 17.03.2022 г.

Принята к публикации 17.03.2022 г.

Рассмотрена концепция испытательного стенда криогенного замедлителя на основе твердого мезитилена для компактного источника нейтронов. Приведены технологические схемы, описан принцип работы, а также программа управления и контроля основными системами испытательного стенда криогенного замедлителя. Детально описаны основные параметры, которые должны быть определены на испытательном стенде после проведения экспериментов по охлаждению до температуры 20 К.

Ключевые слова: компактный нейтронный источник, криогенный замедлитель нейтронов, электроника управления и контроля, технологическая схема.

DOI: 10.31857/S1028096022100053

ВВЕДЕНИЕ

Полномасштабные экспериментальные испытательные стенды шариковых криогенных замедлителей на основе твердого мезитилена импульсного быстрого реактора ИБР-2 создаются в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка с 2010 г. [1–5]. Основной целью испытательного стенда является отработка технологии загрузки твердого вещества (мезитилена) в виде замороженных шариков в камеру криогенного замедлителя (вблизи активной зоны реактора) при очень низких (20–100 К) температурах, а также проверка работоспособности системы его управления и контроля [6–9].

Шариковый способ загрузки камеры замедлителя [10] позволяет легко снимать энерговыделение при замедлении быстрых нейтронов, а также оперативно производить загрузку и выгрузку вещества замедлителя, что делает ресурс работы замедлителя практически неограниченным. Важно и то, что шариковая структура в отличие от цельного замороженного куска материала позволяет образующемуся в результате облучения радиолитическому водороду беспрепятственно покидать камеру замедлителя, не создавая в ней избыточного давления. К основному недостатку шариковой загрузки можно отнести сложность реализа-

ции и обеспечения работоспособности данной технологии [11–13].

Шариковый криогенный замедлитель сохраняет свою работоспособность без смены рабочего вещества – мезитилена – в течение одной кампании (10–12 сут) вплоть до суммарной поглощенной дозы нейтронов и гамма-квантов порядка 100–120 МГр. Такие значения поглощенной дозы обычно характерны для нейтронных источников малой и средней интенсивности (мощностью до 5 МВт) [14–20].

В связи с нарастающим в мире “нейтронным голодом” (спрос на проведение экспериментов с использованием нейтронов сильно превышает предложение, т.е. количество нейтронных источников) большую популярность набирают так называемые компактные источники нейтронов (DARIA (Россия), CANS, INPC (Китай), NOVA ERA (Германия), RANS (Япония)) на основе ускорителя частиц с мишенью из неделящегося материала (Be, W). Преимущество компактных нейтронных источников по сравнению с действующими классическими источниками нейтронов заключается в их относительной дешевизне и возможности “массового” использования при не критическом проигрыше в величине нейтронного потока. Максимальная поглощенная доза в криогенном замедлителе компактного нейтрон-

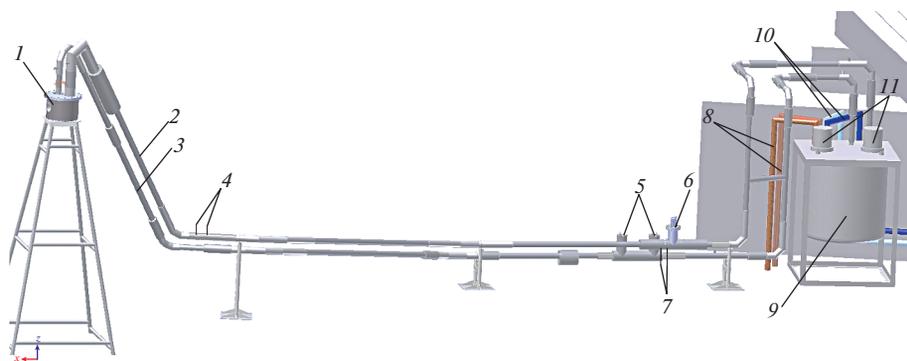


Рис. 1. 3D модель испытательного стенда компактного источника нейтронов: 1 – камера с мезитиленом в вакуумном цилиндрическом кожухе; 2 – трубопровод для подвода мезитилена с гелием к камере; 3 – трубопровод для отвода гелия от камеры; 4, 7 – выходы для датчиков дифференциального давления, отслеживающих движение шариков в трубопроводе; 5 – трубки Пито; 6 – дозирующее устройство; 8 – трубопроводы криогенной гелиевой установки для подвода и отвода гелия; 9 – криостат с теплообменником; 10 – трубопроводы для подвода и отвода гелия в шариковом криогенном замедлителе; 11 – гелиевые газодувки.

ного источника за одну кампанию (10–12 сут) не превышает 10–15 МГр, что без проблем позволяет использовать цельный замороженный кусок мезитилена.

Для таких поглощенных доз использование сложной технологии шариковой загрузки уже не требуется, мезитилен загружают в камеру криогенного замедлителя в жидком виде при комнатной температуре, а охлаждение до твердого агрегатного состояния происходит при помощи независимого внешнего контура и криогенной гелиевой установки заданной мощности. Тем не менее, несмотря на кажущуюся простоту технологии, она также требует отработки и проверки ее работоспособности на полномасштабном испытательном стенде, как и более сложная технология шариковой загрузки.

Цель работы состояла в том, чтобы, используя имеющийся опыт и методику проведения экспериментов на полномасштабных испытательных стендах комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2, разработать концепцию полномасштабного испытательного стенда криогенного замедлителя на основе твердого мезитилена для компактного источника нейтронов с системой управления и контроля.

КОНЦЕПЦИЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО И КРИОГЕННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОГО МЕЗИТИЛЕНА ДЛЯ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

3D модель испытательного стенда криогенного замедлителя приведена на рис. 1, технологическая схема стенда и шарикового криогенного замедлителя – на рис. 2. Испытательный стенд име-

ет особенность – сложный участок подъема на угол 50° и высоту 4 м, что связано с особенностями работы шарикового криогенного замедлителя.

Испытательный стенд имеет с шариковым криогенным замедлителем общий теплообменник, расположенный в криостате с двумя газодувками, обеспечивающими циркуляцию гелия для охлаждения трубопроводов для подвода/отвода мезитилена к камерам. Трубопроводы подвода мезитилена с гелием к камере и отвода от камеры испытательного стенда и замедлителя не соединены между собой и являются отдельными самостоятельными узлами. Охлаждение камеры стенда и замедлителя осуществляется при помощи криогенной гелиевой установки мощностью 1200 Вт, которая производит гелий (температура 10–12 К) и подает его в теплообменник криостата. Также через теплообменник криостата циркулирует гелий в трубопроводах подвода/отвода испытательного стенда и шарикового криогенного замедлителя. Режим работы криогенной гелиевой установки предусматривает как одновременное охлаждение камер стенда и замедлителя, так и их охлаждение по отдельности.

Основным отличием принципа работы испытательного стенда для компактного источника нейтронов от принципа работы шарикового криогенного замедлителя является система подвода мезитилена с гелием и система охлаждения. Если в замедлителе трубопровод, подводящий мезитилен к камере, одновременно является и трубопроводом для охлаждения, то в стенде эти трубопроводы представляют собой независимые контуры (рис. 2, 3).

Принцип работы испытательного стенда заключается в следующем. Определенный объем жидкого мезитилена из специальной емкости и гелий из газгольдера при определенном расходе

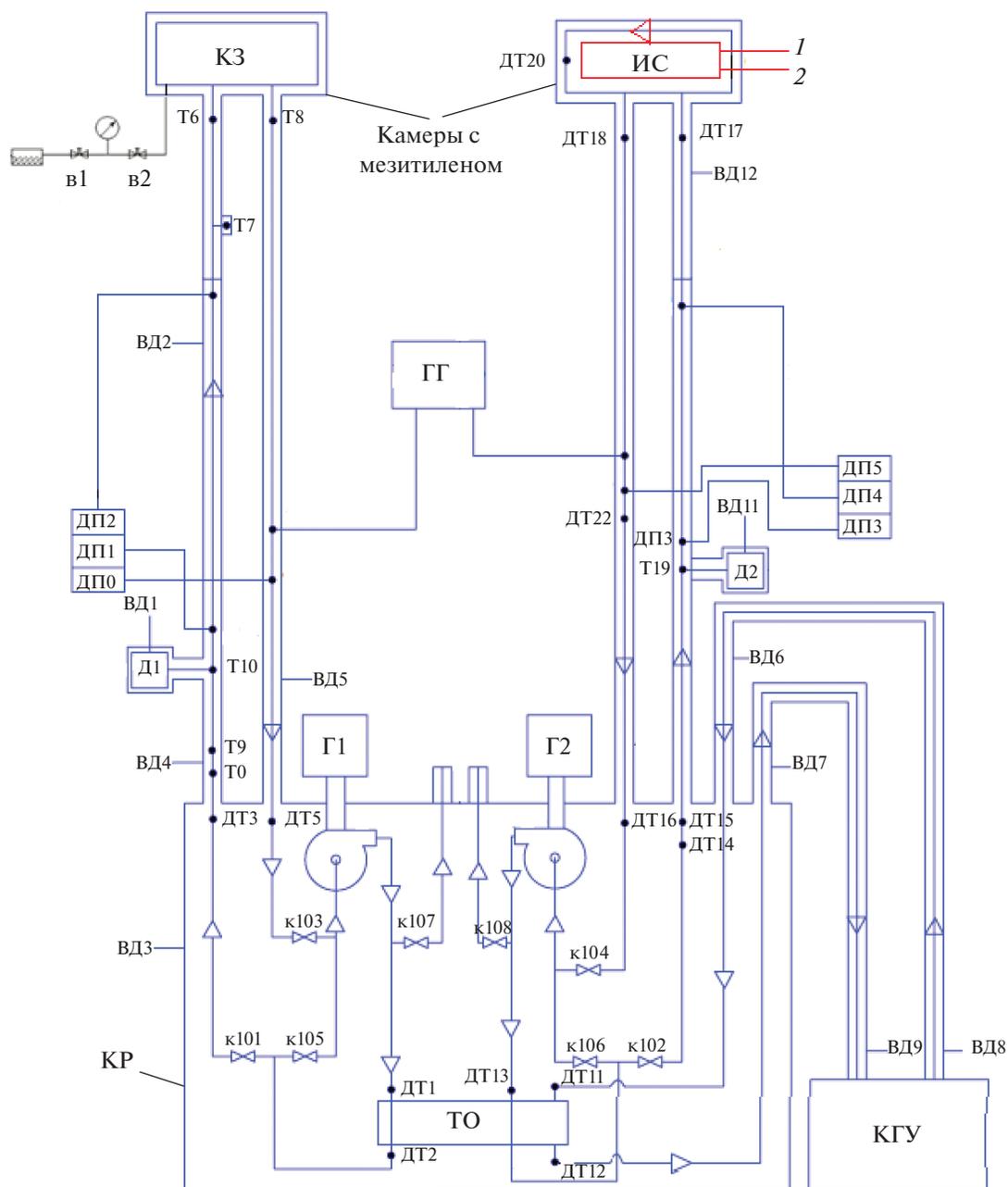


Рис. 2. Технологическая схема испытательного стенда и шарикового крио­генного замедлителя с двумя газодувками, общим теплообменником и крио­генной гелиевой установкой: 1 и 2 – трубопроводы подвода и отвода мезитилена с гелием в камеру, ИС – испытательный стенд; КЗ – камера замедлителя; ДТ – датчики температуры, термодiodы; Т – радиационно-стойкие термопары типа ТХА; ВД – вакуумные датчики; КГУ – крио­генная гелиевая установка; Г1 и Г2 – газодувки; Д1 и Д2 – дозирующие устройства; ДР – датчики дифференциального давления типа DXLdp; в1 и в2 – вентили для слива отработанной смеси мезитилена; к – клапаны криостата; ГГ – газгольдер; ТО – теплообменник; КР – криостат.

подают через вентили В1 и В2 в трубопровод под­вода, а затем в камеру. Предварительно в системе трубопровода подвода при помощи вакуумного насоса ВН1 создается форвакуум. После заполнения камеры мезитиленом начинается ее охлажде­ние гелием (до ~20 К), который циркулирует по

контуру со стороны внешней стенки камеры че­рез теплообменник криостата, также соединен­ный с трубопроводами крио­генной гелиевой установки. Нормальное атмосферное давление в камере во время охлаждения поддерживается за счет гелия из газгольдера. Удаление мезитилена

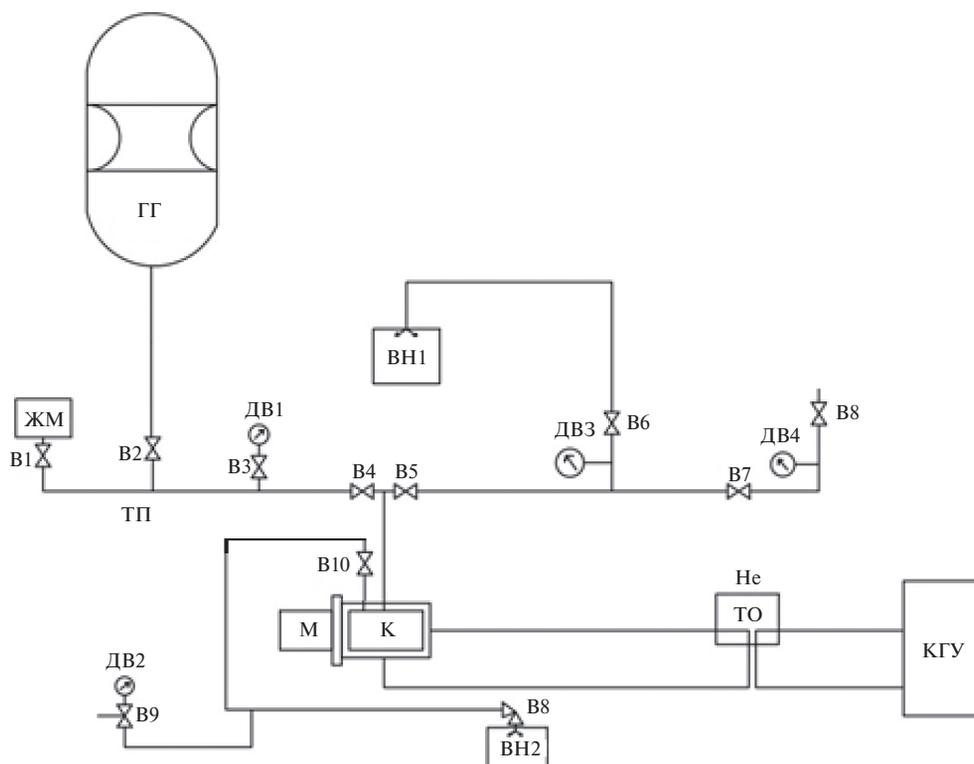


Рис. 3. Технологическая схема испытательного стенда компактного источника нейтронов: ЖМ – жидкий мезитилен; ГГ – газгольдер с гелием; ВН – вакуумный насос; К + М – камера, с возможностью установки бериллиевой мишени; ТО – теплообменник, КГУ – криогенная гелиевая установка; He – гелий, циркулирующий в системе охлаждения; В1–В10 – вентили вакуумные; ДВ1–ДВ4 – датчики вакуумные.

из камеры после окончания проведения экспериментов и отогрева происходит при помощи вакуумного насоса ВН2.

Трубопроводы подвода мезитилена с гелием к камере испытательного стенда компактного источника нейтронов должны иметь внутренний диаметр 16 мм и экранно-вакуумную изоляцию, обеспечивающую теплоприток не более 3 Вт/м при вакууме в изолирующей кожухе порядка 10^{-5} Торр. Давление контролируют при помощи вакуумных датчиков.

Гелиевая газодувка В2 обеспечивает максимальный расход гелия (температура 30 К) до 6 г/с при сопротивлении контура (трубопровода), вызывающем падение давления не выше 7 кПа. Температуры стенок труб, дозатора и камеры регистрируют с помощью термодиодов и термопар. Расход гелия измеряют трубкой Пито и преобразователями перепада низкого давления DXLdp.

Камера испытательного стенда с криогенными трубопроводами (рис. 4) образует первый контур охлаждения, а криогенная гелиевая установка с трубопроводами – второй. Охлаждение второго контура до низких температур обеспечивается циркуляцией гелия по трубопроводам от криогенной гелиевой установки к теплообменнику и

обратно. Охлаждение первого контура происходит за счет циркуляции в нем гелия и его прохождения через теплообменник, находящийся в криостате с вакуумной изоляцией. Постоянное давление внутри камеры с мезитиленом составляет 1.01 атм и поддерживается при помощи газгольдера.

Система управления и контроля, разработанная для шарикового криогенного замедлителя [10], основана на компьютерной программе Cold Moderator (СМ). Она разделена на три части, каждая из которых отвечает за прием и обработку информации, получаемой на криогенной гелиевой установке КГУ_Viewer (рис. 5), испытательном стенде (СМ_201) и шариковом криогенном замедлителе (СМ_202). Каждая программа имеет свой конфигурационный файл, определяющий, какую информацию о параметрах работы необходимо извлечь. Информация о параметрах криогенной гелиевой установки (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

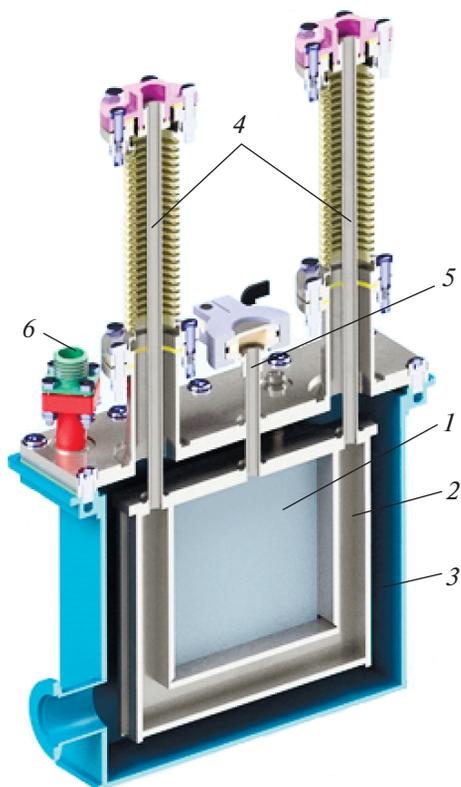


Рис. 4. Камера испытательного стенда компактного источника нейтронов: 1 – полость с мезитиленом и гелием; 2 – первый контур охлаждения; 3 – вакуумная полость; 4 – трубопроводы для отвода/подвода гелия в первом контуре охлаждения; 5 – трубка заполнения мезитилена с гелием; 6 – фланец вывода термодатчиков.

частоте вращения вала газодувки. Вся информация записывается в файлы для просмотра и анализа. Аварийные ситуации, такие как потеря расхода газа, рост температуры, изменение давления, сопровождаются светозвуковой сигнализацией.

ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЗАГРУЗКЕ КАМЕРЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Для определения работоспособности криогенного замедлителя компактного источника нейтронов на основе твердого мезитилена необходимо провести эксперименты по исследованию возможности загрузки камеры испытательного стенда, а также определить оптимальные параметры во время загрузки: температуру криогенных трубопроводов, давление, массовый расход транспортируемого газа – гелия, скорость загрузки мезитилена из дозирующего устройства (как необлученного, так и облученного, с максимальной вязкостью 175 мПа · с), время загрузки камеры. Кроме того, необходимо определить оптимальный режим охлаждения испытательного стенда с криогенной гелиевой установкой мощностью 1200 Вт.

При проведении экспериментов по загрузке камеры испытательного стенда необходимо учитывать границы определяемых параметров, полученные в ходе экспериментов на испытательном стенде шарикового криогенного замедлителя.

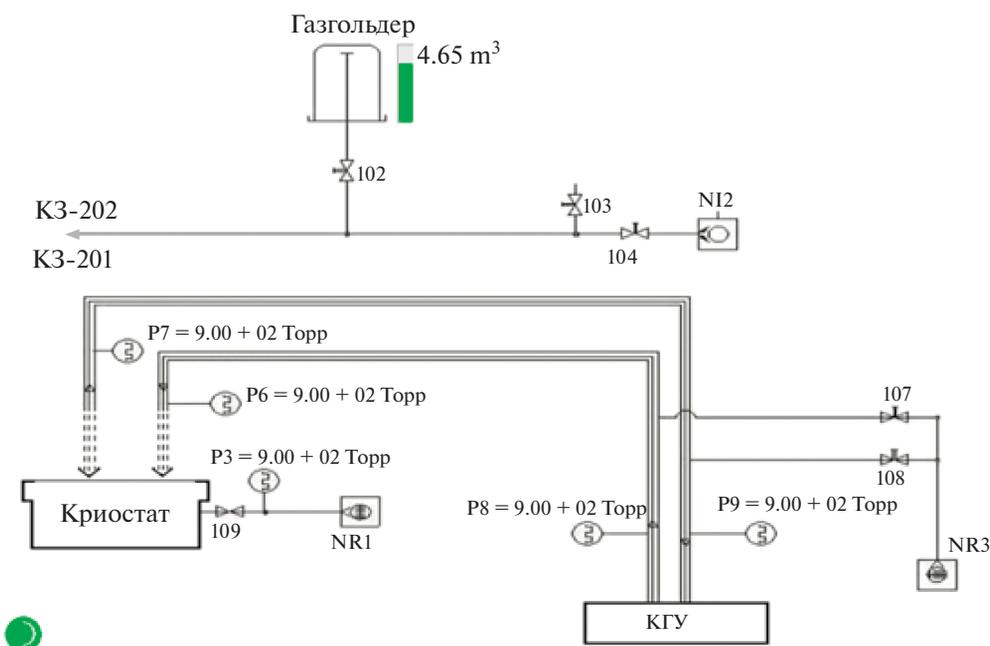


Рис. 5. Компьютерная программа KGU_Viewer испытательного стенда K3201.

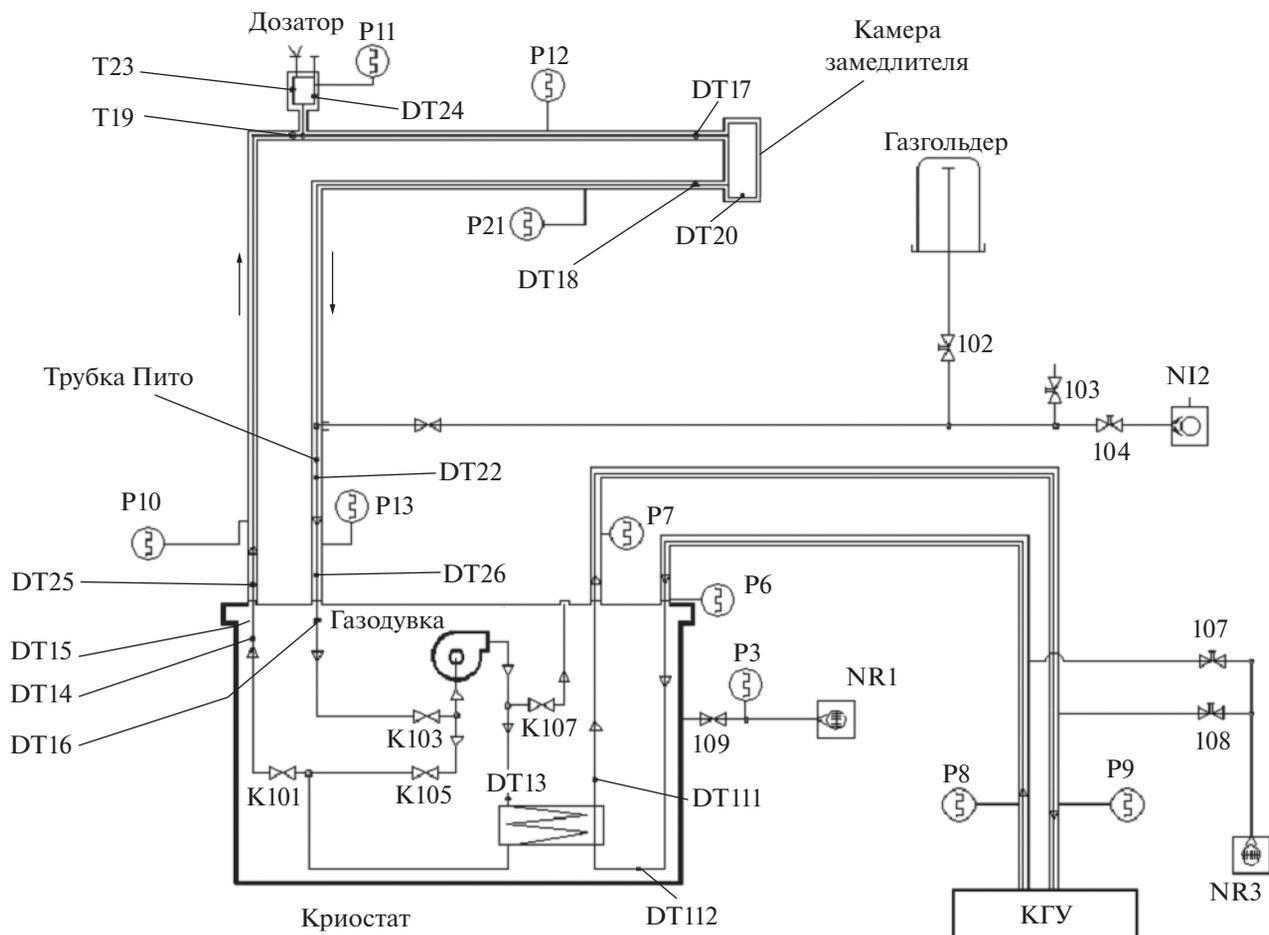


Рис. 6. Мнемосхема компьютерной программы CM_201 на основе технологической схемы испытательного стенда.

Температура внутри первого контура охлаждения стенда при загрузке шариков должна понижаться поэтапно, от 293 до 20 К. Режим низкой температуры в криогенном транспортном трубопроводе любого контура поддерживается за счет вакуума в изолирующем пространстве на уровне 10^{-5} торр.

Для стабильного охлаждения системы минимальный расход гелия в криогенном трубопроводе первого контура 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 не должно превышать 900 торр.

Режим загрузки мезитилена в камеру испытательного стенда должен быть подобран таким образом, чтобы, с одной стороны, время заполнения камеры было минимальным, а с другой стороны, ее объем был целиком заполнен мезитиленом перед началом охлаждения. Планируемое время загрузки жидкого мезитилена в камеру до начала охлаждения 2 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная концепция испытательного стенда компактного источника нейтронов с системой управления и контроля может быть реализована на базе испытательного стенда шарикового криогенного замедлителя, расположенного в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований. Имеющийся опыт по разработке, пусконаладочным работам, эксплуатации и проведению большого количества экспериментов по загрузке камер испытательного стенда шарикового криогенного замедлителя реактора ИБР-2 позволят разработать проект испытательного стенда компактного источника нейтронов, реализовать его технически, а также провести целый ряд экспериментов по загрузке камеры. Успешная реализация концептуального проекта криогенного замедлителя компактного источника нейтронов позволит с высокой долей вероятности реализовать проект первого в России компактного источника нейтронов DARIA.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bulavin M., Verhogyadov A., Kulagin E., Kulikov S., Shabalin D., Shabalin E.* 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.
2. *Kulikov S., Ananiev V., Belyakov A. et al.* // JPS Conf. Proc. 2018. V. 22. P. 011001.
3. *Anan'ev V.D., Belyakov A.A., Bogdzal' A.A. et al.* // Instrum. Exp. Tech. 2013. V. 56. P. 116. <https://doi.org/10.1134/S0020441213010016>
4. *Beliakov A., Bulavin M., Verhogyadov A., Kulikov S., Mukhin K., Shabalin E.* // Phys. Particles Nucl. Lett. 2013. V. 10. № 2. P. 230.
5. *Ананьев В.Д., Беляков А.А., Булавин М.В., Верхоглядов А.Е., Куликов С.А., Мухин К.А., Шабалин Е.П.* // Журн. техн. физики. 2014. Т. 8. Вып. 2. С. 131.
6. *Bulavin M., Verkhogliadov A., Kulikov S., Shabalin E.* // Nucl. Instrum Methods Phys. Res. B. 2014. V. 320. P. 70.
7. *Belyakov A.A., Bulavin M.V., Verkhoglyadov A.E. et al.* // Phys. Particles Nucl. Lett. 2015. V. 12. № 6. P. 773.
8. *Bulavin M.V., Belyakov A.A., Verkhoglyadov A.E. et al.* // Phys. Particles Nucl. Lett. 2016. V. 13. № 6. P. 774.
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. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2020612304 (РФ). Система контроля криогенного замедлителя реактора ИБР-2 / ОИЯИ. *Петухова Т.Б.* // Заявка № 2020611345. 19.02.2020. С. 2.
11. *Bulavin M.V., Yskakov A., Mukhin K.A.* // RAD Conf. Proc. 2020. V. 4. P. 81. <https://doi.org/10.21175/RadProc.2020.17>
12. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. et al.* // Rad. Phys. Chem. 2003. V. 67. P. 315.
13. *Bulavin M.V., Mukhin K.A., Yskakov A. et al.* // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2022. V. 16. № 1. P. 1.
14. *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.
15. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2004. V. 215. Iss. 1–2. P. 181.
16. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. Et al.* Solid Methane Cold Moderator at the IBR-2 Reactor: Test Operation at 2 MW // 2nd Int. Meeting on Pulsed Advanced Neutron Sources. Dubna, 1994. P. 217
17. *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>
18. *Ananiev V., Beliakov A., Bulavin M.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. № 746. P. 012031.
19. *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.
20. *Shabalin E.P., Kulikov S., Kulagin E. et al.* Solid Methane Cold Moderator for the IBR-2 Reactor // Int. Workshop on Cold Moderators for Pulsed Neutron Sources. Argonne, 1997. P. 73.

Concept of a Test Bench for a Cryogenic Moderator of a Compact Neutron Source

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

¹Joint Institute for Nuclear Research, Moscow oblast, Dubna, 141980 Russia

²Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199034 Russia

³Institute of Nuclear Physics, Almaty, 050032 Kazakhstan

*e-mail: bulavin85@inbox.ru

The concept of a test bench for a cryogenic moderator based on solid mesitylene for a compact neutron source is considered. Technological schemes are given; the operation principle is described, as well as a control and monitoring for the main systems of the cryogenic moderator test bench. The main parameters are described in detail, which should be determined on the test bench after the experiments on cooling to a temperature of 20 K.

Keywords: compact neutron source, cryogenic neutron moderator, control and monitoring electronics, technological scheme.