

УДК 536.48; 621.039

Концепция общего криогенного обеспечения экспериментальных устройств

*Канд. физ.-мат наук А. А. ЗАХАРОВ,**Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН**188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща**Д. Э. АГЕЙСКИЙ, И. Н. БЕЛИКОВ**communist1138@gmail.com**Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО**Институт холода и биотехнологий**191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

Рассмотрено создание криогенной системы коллективного пользования, когда одна производительная криогенная установка одновременно и непрерывно обслуживает несколько экспериментальных устройств. В предложенной схеме криогенной системы коллективного пользования температурный режим работы криогенной установки не зависит от режимов работы экспериментальных устройств, которые она обслуживает, благодаря наличию у них собственных контуров циркуляции гелия.

Ключевые слова: криогенное экспериментальное устройство, криогенная установка коллективного пользования.

Concept of the general cryogenic providing experimental devices

A. A. ZAHAROV,*The Petersburg institute of nuclear physics
of B. P. Konstantinov***D. E. AGEYSKIY, I. N. BELIKOV***communist1138@gmail.com**University ITMO**Institute of Refrigeration and Biotechnologies
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

The article describes a new concept how to use the cryogenic helium refrigerator for cooling of several experimental devices operating at different temperature levels. In the offered scheme of cryogenic system of collective using the temperature operating mode of cryogenic installation doesn't depend on operating modes of experimental devices which it serves, thanks to existence at them own contours of circulation of helium.

Keywords: cryogenic experimental device, multiuser cryogenic facility.

Иногда нейтронные установки имеют сразу несколько криогенных экспериментальных устройств [9–14]. Снабжение каждого устройства собственной криогенной установкой оборачивается рядом негативных моментов, которые связаны с недостатком места для размещения оборудования, повышенными расходами на эксплуатацию и обслуживание, высокой стоимостью самих установок, их монтажа и пуско-наладочных работ. В связи с этим возникает вопрос об оптимизации криогенной системы охлаждения таким образом, чтобы избежать дублирования отдельных систем и оборудования.

Возможно ли создание криогенной системы коллективного пользования, когда одна производительная криогенная установка одновременно и непрерывно обслуживает несколько экспериментальных устройств?

Криогенная система коллективного пользования

Наряду с положительными моментами, к которым относятся — меньшее количество оборудования, существенно меньшие площади размещения и затраты на обслуживание — имеется и ряд сложностей. Они связаны с тем, что экспериментальные устройства работают на разных температурных уровнях, имеют разную тепловую нагрузку и собственные режимы работы. В отличие от экспериментальных устройств, криогенная установка коллективного пользования должна работать длительное время в стационарном режиме независимо от режимов потребителей. Такое условие возможно, если организовать двухконтурную схему охлаждения, при которой криогенная установка имеет свой гелиевый контур, а каждое экспериментальное устройство будет иметь собственный контур циркуляции гелия, который будет обеспечивать все необходимые режимы работы. Отвод тепла из контура экспериментального устройства в контур криогенной установки будет производиться с помощью общего

Введение

В настоящее время многие исследовательские ядерные реакторы и импульсные ускорители оснащаются источниками холодных нейтронов [1–4] и низкотемпературными каналами для облучения материалов [5–7], которые работают при криогенных температурах с высокими тепловыми нагрузками, вызванными радиационным нагревом материала. Источники ультрахолодных нейтронов со сверхтекучим гелием могут иметь тепловое экранирование холодным гелием от рефрижератора [8].

теплообменника. В такой схеме должно соблюдаться единственное требование, которое заключается в том, чтобы суммарная текущая тепловая нагрузка на экспериментальных устройствах не превышала максимальную холодопроизводительность криогенной установки коллективного пользования. Принципиальная блочная схема криогенной системы коллективного пользования показана на рис. 1.

Управление криогенной установкой производится штатной системой управления и не требует дополнительного вмешательства, следующего из режимов работы экспериментальных устройств. Работа экспериментального устройства обеспечивается собственным контуром циркуляции гелия. За счет этого контура становится возможным обеспечить работу экспериментального устройства на температурном уровне выше того, который предоставляет криогенной установкой. Температурный уровень работы экспериментального устройства может быть как постоянным, так и переменным при необходимости.

Блок охлаждения гелиевого рефрижератора поставляет гелий с температурой 14 К к экспериментальным устройствам. Гелий поступает в теплообменные блоки через вентили подачи газа к экспериментальному устройству. Вентиль подачи газа управляется со стороны экспериментального устройства и регулирует количество газа, поступающего на общий теплообменник теплообменного блока. Если суммарный расход холодного гелия на экспериментальных устройствах меньше расхода, предоставляемого криогенной установкой, то приоткрывается холодный байпас установки, с помощью которого поддерживается постоянное давление в линии подачи холодного гелия.

На возврате холодного гелия в блок охлаждения после смешения потоков от экспериментальных устройств с помощью нагревателя поддерживается постоянная температура на уровне примерно 19 К. Таким образом, криогенная установка коллективного пользования работает в стационарном режиме. Следует еще раз отметить, что тепло, отводимое гелием от экспериментальных установок, не должно превышать холодопроизводительность криогенной установки.

Тепловой баланс работы криогенной системы коллективного пользования описывается уравнением:

$$Q_x = Q_n + Q_1 + Q_2 + \dots + Q_p \quad (1)$$

где Q_x — производительность криогенной установки;

Q_n — тепло, подводимое нагревателем;

Q_1, Q_2, Q_i — тепловые нагрузки экспериментальных устройств.

Тепло, отводимое криогенной установкой (холодопроизводительность):

$$Q_x = C_p M (T_B - T_X), \quad (2)$$

где C_p — теплоемкость гелия;

M — массовый расход гелия в криогенной установке;

T_X — температура гелия на выходе из блока охлаждения;

T_B — температура гелия на возврате в блок охлаждения.

Массовый расход гелия в криогенной установке:

$$M = m_0 + m_1 + m_2 + \dots + m_p \quad (3)$$

где m_0 — массовый расход гелия через холодный байпас;

m_1, m_2, m_i — массовые расходы гелия через теплообменные блоки.

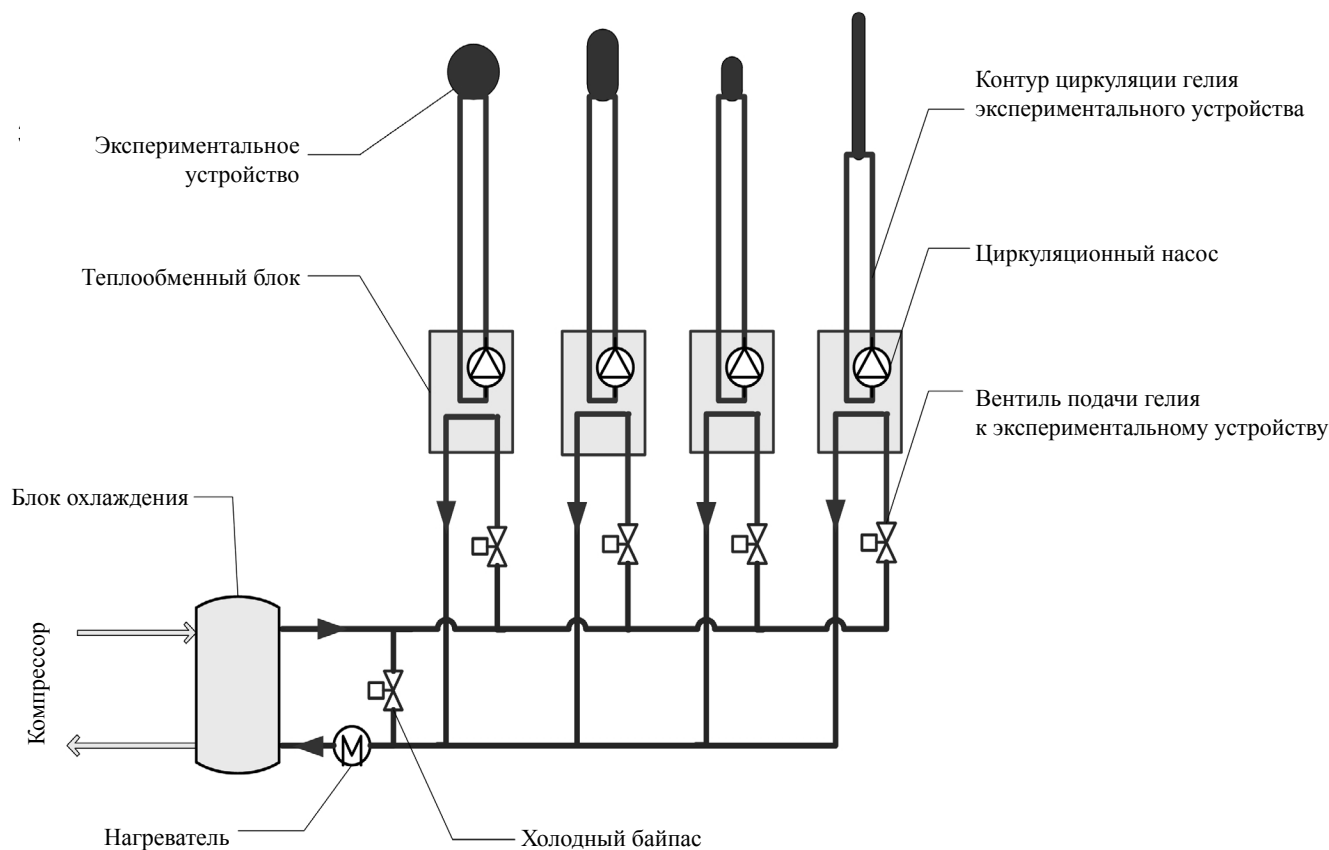


Рис. 1. Криогенная система коллективного пользования

Тепло, отводимое от экспериментального устройства в теплообменном блоке

$$Q_i = C_p m_i (T_i - T_x), \quad (4)$$

где T_x — температура гелия на входе в теплообменный блок;

T_i — температура гелия на выходе из теплообменного блока.

Если принять во внимание, что температура на входе в теплообменные блоки везде одинаковая, а теплоемкость гелия в диапазоне температур от 14 К до 300 К меняется всего на 1,7%, то, используя уравнения (1) (2) и (4), можно записать баланс работы криогенной системы коллективного пользования в следующем виде:

$$M T_B = m_0 T_B + m_1 T_1 + m_2 T_2 + \dots m_i T_i \quad (5)$$

где T_B — температура гелия на возврате в блок охлаждения;

T_1, T_2, T_i — температуры гелия на выходе из теплообменных блоков.

Собственный контур циркуляции гелия экспериментального устройства

Собственный контур циркуляции гелия обеспечивает отвод радиационного тепла от экспериментального устройства. Циркуляция гелия в контуре производится с помощью криогенного насоса, который обеспечивает массовый расход газа для поддержания необходимой температуры устройства.

В зависимости от температурного уровня работы экспериментального устройства, тепловой нагрузки и режимов работы для каждого устройства разрабатывается свой криогенный теплообменный блок, в состав которого входят теплообменники, управляющая арматура, температурные датчики, криогенный циркуляционный насос, ресивер для гелия и фильтр для задержания механических частиц. Теплообменный блок соединяется двумя гелиевыми криопроводами с криогенной установкой коллективного пользования и двумя криопроводами с экспериментальным устройством. Блок обеспечивает отвод тепла от экспериментального устройства, как в холодном режиме работы, так и в теплом режиме, когда криогенная установка отключена.

Перейдем к рассмотрению работы теплообменного блока, принципиальная схема которого представлена на рис 2. Тепло от экспериментального устройства отводится потоком гелия, который создается криогенным насосом КН1, и передается в теплообменнике ТОО потоку гелия криогенной установки. Минимальная температура экспериментального устройства достигается когда холодный гелий от криогенной установки поступает в общий теплообменник ТОО через вентиль КВ2, минуя теплообменник ТО1.

Температура экспериментального устройства, при наличии в нем постоянного тепловыделения, может быть повышена вплоть до комнатных температур поэтапно тремя способами: подачей гелия от криогенной установки через вентиль КВ1 в теплообменник ТО1 для его подогрева гелием выходящим из теплообменника ТОО, снижением потока холодного гелия поступающим

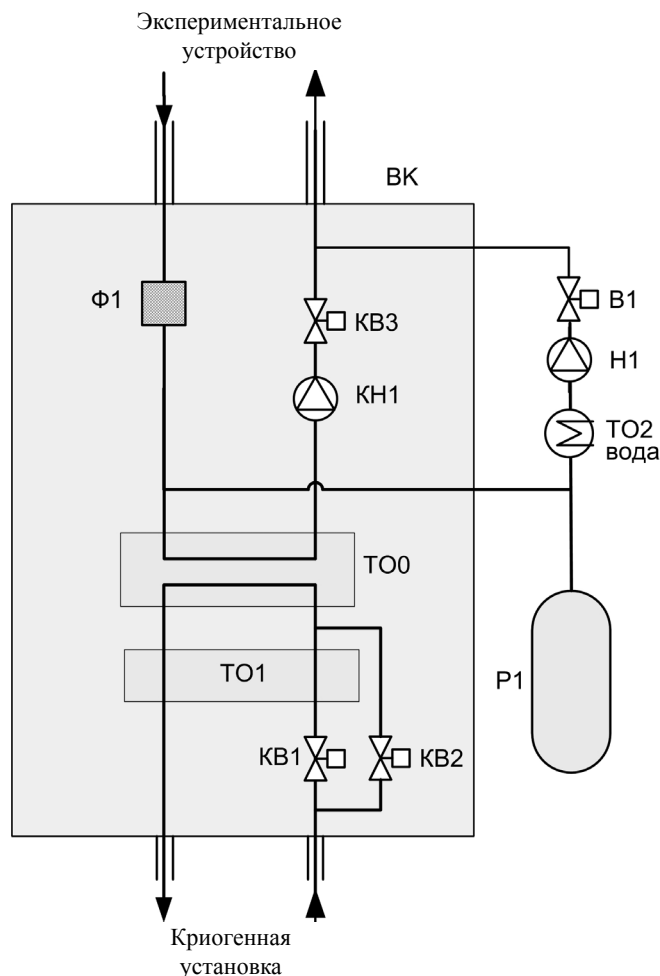


Рис. 2. Принципиальная схема теплообменного блока экспериментального устройства:

ТОО — общий теплообменник; ТО1 — теплообменник гелиевого контура криогенной установки; ТОО2 — теплообменник, охлаждаемый водой; КВ1 — вентиль подачи гелия от криогенной установки в теплообменники ТО1, ТОО;

КВ2 — байпасный вентиль теплообменника ТО1;

КВ3 — вентиль подачи холодного гелия в экспериментальное устройство;

В1 — вентиль подачи тёплого гелия в экспериментальное устройство; КН1 — криогенный циркуляционный насос;

Н1 — тёплый циркуляционный насос; Р1 — ресивер для гелия;

Ф1 — фильтр для задержания механических частиц;

ВК — вакуумный кожух

от криогенной установки и снижением циркуляционного потока экспериментального устройства за счет понижения оборотов криогенного насоса КН1.

Такая схема работы теплообменного блока позволяет не только обеспечивать необходимый температурный уровень работы экспериментального устройства, но и проводить термоциклирование образцов различных материалов в процессе их облучения в низкотемпературном канале реактора.

Когда нет необходимости в работе экспериментального устройства при криогенных температурах или в случае отключения криогенной установки, радиационное тепло, выделяемое в материале устройства, отводится потоком теплого гелия и удаляется водой в теплообменнике ТОО2. Циркуляция теплого гелия в контуре экспериментального устройства создается насосом Н1.

Заключение

В предложенной схеме криогенной системы коллективного пользования температурный режим работы криогенной установки не зависит от режимов работы экспериментальных устройств, которые она обслуживает, благодаря наличию у них собственных контуров циркуляции гелия.

При использовании криогенной системы коллективного пользования появляется возможность перераспределять потоки холодного гелия между потребителями холода.

Комплектование гелиевого компрессора криогенной установки частотным регулятором оборотов двигателя позволит снижать производительность установки для экономии электроэнергии. Это важно в том случае, если одно или более экспериментальных устройств не работают в холодном режиме.

Поскольку собственный контур циркуляции криогенного экспериментального устройства оснащен циркуляционным насосом, то появляется возможность транспортировки холодного гелия по криопроводам на значительные расстояния.

Существенным положительным моментом наличия собственного контура циркуляции экспериментального устройства является возможность отвода радиационного тепла с помощью собственного гелиевого насоса и водяного холодильника, когда нет необходимости или возможности поддерживать холодный режим работы устройства.

Присутствие массивных теплообменников в контуре циркуляции экспериментального устройства оказывает влияние на переходные тепловые процессы, делая их более плавными.

Наличие собственного контура циркуляции экспериментального устройства исключает попадание активированных частиц в гелиевый цикл криогенной установки и тем самым предотвращает ее радиоактивное загрязнение. Это особенно актуально для низкотемпературных каналов в которых производится облучение образцов из различных материалов.

В случае источника холодных нейтронов с жидким водородом при аварийной разгерметизации водородной полости исключается распространение водорода за пределы собственного контура циркуляции, а сам он образует безопасную смесь с гелием.

Один из недостатков криогенной системы коллективного пользования состоит в том, что все потребители зависят от одной криогенной установки и в случае ее неисправности экспериментальные устройства не смогут продолжить работу в холодном режиме. С этим можно согласиться, но только это не недостаток, а особенность всех систем коллективного пользования. Такой системой является и сам исследовательский реактор или ускоритель. Следует отметить, что системы коллективного пользования уже давно широко используются как более эффективные и при должном подходе имеют достаточную надежность в работе.

Создание криогенной системы коллективного пользования для экспериментальных устройств будет сов-

ременным и эффективным подходом к решению задачи криогенного обеспечения научных экспериментов на исследовательских реакторах и ускорителях.

Работа поддержана министерством образования и науки РФ (ГК №14.518.11.7028) в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

Список литературы

1. *Gobrecht K., Gutmiedl E., Scheuer A.* Status report on the cold neutron source of the garching neutron research facility FRM-II. // *Physica B*. 2002. Vol. 311.
2. *Kim Young Ki, Lee Kye Hong, Kim Hark Rho.* Cold neutron source at KAERI, Korea. *Nuclear Engineering and Design*. 2008. Vol. 238. Issue 7.
3. *Lu W., Thiering R.* The OPAL Cold Neutron Source Heat Load Measurements // *Proceedings of the IGORR 2009*. Beijing, China.
4. *Williams R. E., Kopetka P., Rowe J. M.* An Advanced Liquid Hydrogen Cold Source for the NIST Research Reactor // *Abstracts of the 7-th Meeting of the IGORR*. S. C. de Bariloche, Argentina, October 26–29, 1999. P. 16.
5. *Coltman R. R., Klabunde C. E., Kerchner H. R., Richardson S. A., Greenwood L. R.* The low-temperature neutron irradiation facility at Oak Ridge National Laboratory. // *Journal of Nuclear Materials*. 166 (1989).
6. *Okada M., Kanazawa S., Nozaki T. et al.* Improvement of low-temperature irradiation facility at Kyoto University Reactor (KUR). // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2001. Vol. 463. Issues 1–2.
7. *Inaba Y., Tsuchiya K., Shikama T. et al.* Feasibility study on cryogenic irradiation facility in JMTR. // *Fusion Engineering and Design*. 2011. Vol. 86. Issues 2–3.
8. *Захаров А. А., Серебров А. П.* Криогенный цикл со сверхтекучим гелием. // *Вестник Международной академии холода*. 2011. №4.
9. *Ageron P.* Cold neutron sources at ILL. // *Nuclear instruments and methods in physics research A*. 1989. Vol. 284.
10. *Farnoux B., Maziere M.* New cold neutron source of the ORPHEE reactor // *Proceedings of the 5-th Assian Symposium of Research Reactor*. Taejon, Korea, May 29–31, 1996.
11. *Захаров А. А.* Концепция общего криогенного обеспечения на реакторе ПИК. Препринт ПИЯФ. 2012. №2902.
12. *Taylor A.* A second target station for ISIS. // *Physica B*. 276–278 (2000).
13. *Carpenter J. M., Mason T. E.* A long-wavelength target station for the spallation neutron source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 545, Issues 1–2, 11. 2005.
14. *Crispel S., Bonneton M., Thiering R. et al.* Design and testing of cryogenic systems dedicated to neutron sources. *Proceedings of IPAC'10*, Kyoto, Japan.