

Запуск полномасштабной модели источника ультрахолодных нейтронов со сверхтекучим гелием

© А.П. Серебров,¹ В.А. Лямкин,¹ Д.В. Прудников,¹ К.О. Кешишев,² С.Т. Болдарев,² А.В. Васильев¹

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“
188300 Гатчина, Ленинградская область, Россия

²Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН,
119334 Москва, Россия
E-mail: serebrov@npi.spb.ru

(Поступило в Редакцию 20 июня 2016 г.)

Разработан проект источника ультрахолодных нейтронов (УХН) для реактора ВВР-М, основанный на использовании сверхтекучего гелия для производства УХН. Создана полномасштабная модель источника, которая включает в себя все необходимое криогенное и вакуумное оборудование, а также криостат и модель источника УХН. После проведенных практических экспериментов на технологическом комплексе источника УХН была получена температура сверхтекучего гелия $T = 1.08$ К без тепловой нагрузки и температура $T = 1.371$ К при тепловой нагрузке на имитаторе $P = 60$ W. Результат демонстрирует возможность реализации проекта источника УХН на реакторе ВВР-М и возможности применения сверхтекучего гелия в атомных технологиях.

DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44142.1941

Введение

Ультрахолодные нейтроны (УХН) обладают свойством отражаться от вещества при любых углах падения, поэтому их можно хранить в материальных ловушках десятки и сотни секунд. Это открывает уникальные возможности изучения самого нейтрона — измерения электрического дипольного момента нейтрона, что имеет принципиально важное значение для изучения фундаментальных взаимодействий в физике элементарных частиц [1].

В настоящее время данное направление исследований с ультрахолодными нейтронами активно развивается в мире с очевидной конкуренцией национальных приоритетов. Если в 80-х г. было только два центра — Петербургский институт ядерной физики (ПИЯФ) (Гатчина) и Институт Ладэ-Лапжевена (ИЛЛ) (Гренобль), где проводились исследования по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона с помощью УХН, то сейчас их уже девять. Точность измерений определяется интенсивностью источника ультрахолодных нейтронов. Поэтому там, где будет создан наиболее интенсивный источник УХН, и будет получен наиболее точный результат, а возможно, открыт ЭДМ нейтрона, что будет важнейшим событием в физике.

Если в физике высоких энергий определяющий параметр — это энергия протонов на коллайдерах, то в нашем случае это интенсивность пучка УХН.

Наша цель состоит в создании самого интенсивного источника УХН на реакторе ВВР-М ПИЯФ НИЦ КИ и проведение измерений ЭДМ нейтрона с точностью $3 \cdot 10^{-28}$ е · см.

Использование сверхтекучего гелия для производства ультрахолодных нейтронов

Метод получения УХН на реакторе ВВР-М в ПИЯФ будет основан на эффекте их производства и накопления в сверхтекучем ^4He из-за особенностей этой квантовой жидкости [2]. При имеющемся технологическом оснащении и инфраструктуре на реакторе ВВР-М температуру гелия в камере источника возможно будет поддерживать на уровне 1.2–1.3 К прямой вакуумной откачкой паров ^4He . При этом прогнозируемая тепловая нагрузка на сверхтекучий гелий ожидается равной 20 W. Время хранения нейтронов при температуре $T = 1.2$ К в камере источника УХН оценивается в 30 s, а при температуре $T = 1.33$ К в 15 s. Время выхода УХН из источника в нейтронотвод составляет приблизительно 5 s, поэтому эффект зависимости интенсивности источника от температуры в указанном диапазоне будет составлять приблизительно 10%.

Сверхтекучий гелий обладает колоссальной прозрачностью для нейтронов низких энергий. Кривая Ландау, связывающая энергию и импульс возбуждений (фононов, ротонов) в сверхтекучем гелии, пересекается с кривой $E = p^2/2m$ для нейтрона в одной точке. Эта точка соответствует энергии возбуждения (в единицах температуры) 12 К. Это означает, что УХН может „поглотить“ только фонон с энергией 12 К. Таких фононов при температуре сверхтекучего гелия 1 К практически нет, этим и объясняется исключительная прозрачность сверхтекучего гелия для УХН. Ультрахолодные нейтроны „рождаются“ в гелии из холодных нейтронов с длиной волны 9 Å или энергией 12 К, которая как раз

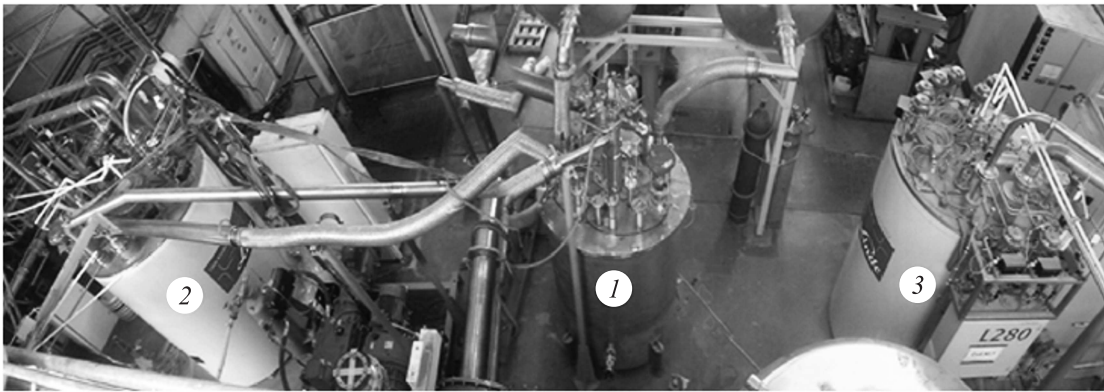


Рис. 1. Полномасштабная технологическая модель источника УХН. 1 — криостат, 2 — гелиевый рефрижератор TCF-50, 3 — гелиевый ожижитель L-280.

равна энергии фона, т. е. холодный нейтрон возбуждает фон и сам практически останавливается, становясь ультрахолодным. Холодные нейтроны проникают через стенку ловушки, а ультрахолодные отражаются, поэтому возможен эффект накопления УХН до плотности, определяемой временем хранения в ловушке с гелием.

Количественное производство УХН зависит от интенсивности реакторного нейтронного потока и эффективности криогенного замедлителя (конвертора). Однако стремление разместить замедлитель с криогенной температурой в высоком нейтронном потоке на реакторе наталкивается на проблему отвода радиационного тепла. Чем ниже температура замедлителя, тем сложнее проблема отвода теплоты.

Эксперименты по накоплению УХН в ловушках со сверхтекучим гелием успешно выполнены на пучках холодных нейтронов [3,4]. Уже на пучке удалось получить плотность УХН, сравнимую с плотностью УХН, выведенной от источника в реакторе. Расходимость пучка нейтронов очень мала по отношению к 4λ . В условиях облучения 4λ можно выиграть 3–4 порядка величины. Возникает вопрос: в каких условиях облучения может работать источник на основе сверхтекучего гелия, какую мощность можно снимать при температуре около 1 К? Мы можем ставить задачу о удалении мощности 20 W при температуре 1.2 К, тогда эта задача решается с помощью доступного гелиевого ожижителя с производительностью 961 жидкого гелия в час и с помощью системы вакуумной откачки паров гелия, чтобы получить температуру 1.2 К. Для успешного решения задачи нужно найти компромисс между уровнем тепловыделения и нейтронным потоком.

На реакторе ВВР-М ПИЯФ имеются весьма подходящие условия для решения такой задачи. Это наличие тепловой колонны реактора, которая представляет собой канал большого диаметра (1 м), примыкающий к активной зоне реактора [5,6]. Такой диаметр канала позволяет расположить мощную свинцовую защиту от γ -излучения активной зоны реактора, графитовый предзамедлитель,

замедлитель из жидкого дейтерия при температуре 20 К, чтобы получать холодные нейтроны, и наконец, собственно источник УХН на основе сверхтекучего гелия при температуре 1.2 К.

Для проверки практической реализации проекта была создана полномасштабная технологическая модель источника, где радиационная тепловая нагрузка заменена электрическим нагревателем.

Полномасштабная модель источника УХН

Для отладки режимов работы криогенного и вакуумного оборудования для технологического комплекса УХН, а также для получения изотопно-чистого He^4 в ПИЯФ была смонтирована полномасштабная технологическая модель источника ультрахолодных нейтронов со сверхтекучим гелием [7,8] (рис. 1).

Рис. 2 приводит структурную схему основного технологического оборудования источника.

Работа источника обеспечивается четырьмя основными независимыми установками:

- гелиевый рефрижератор,
- гелиевый ожижитель,
- вакуумная установка,
- защитный вакуум.

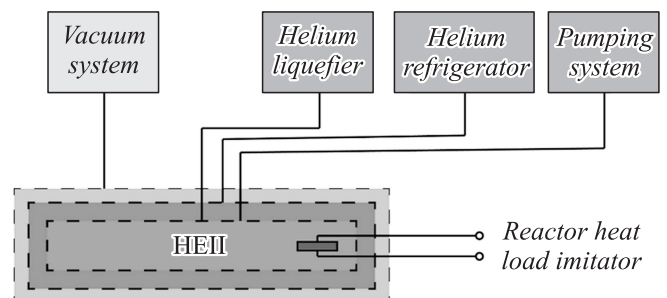


Рис. 2. Блок-схема технологического оборудования источника.

Гелиевый рефрижератор мощностью 3000 W работает на температурном уровне 15 K и обеспечивает экранирование низкотемпературной части источника от теплопритоков извне, а в перспективе будет ожигать жидкодейтериевый предзамедлитель, внутри которого будет помещена камера источника.

Гелиевый ожигатель работает на температурном уровне 4.2 K. Ожигатель обеспечивает заполнение системы жидким гелием, подачу жидкого гелия взамен испарившегося. Производительность ожигателя достигает 96 l/h.

Вакуумная установка работает при давлении 50 Pa и обеспечивает удаление паров гелия для снижения его температуры до 1.2 K. От тепловой нагрузки 20 W в источнике будет испаряться порядка 1 g/s гелия. Сделаем приблизительные оценки для гелия, которым необходимо пополнять источник во время работы. Делая допущение, что энтальпия гелия при 1 K равна 0, при энтальпии гелия при 4.2 K, равной 9.6 J/g от гелия с расходом 1 g/s, поступившего на охлаждение до 1 K, потребуется отводить 9.6 W. Таким образом, помимо испарения 1 g/s от прямой тепловой нагрузки необходимо еще 0.5 g/s для понижения температуры гелия до 1 K. Суммарная нагрузка на вакуумные насосы, которая складывается из паров, образующихся за счет нагрева, и паров, которые надо удалить для охлаждения жидкости (33% от общей нагрузки), составит 0.375 mol/s или 1.5 g/s.

Турбомолекулярный насос поддерживает высокий защитный вакуум всей низкотемпературной части ниже 10^{-5} Torr.

Все процессы получения сверхнизких температур осуществляются в криостате [9]. Принципиальную низкотемпературную схему источника УХН представляет рис. 3. Камера модели источника УХН на реакторе ВВР-М 1 имеет объем, равный 35 l. Камера заполнена сверхтекучим гелием при температуре 1.2 K. К камере подходит труба 2 длиной около 3 м. Эта труба служит для откачки паров испарившегося гелия, а в последствии будет служить нейтроноводом УХН. Трубопровод откачки 13 подходит к „нейтроноводу“ 2 вертикально и отводит пары гелия из ванны модели источника УХН 1 и нижней ванны 5.

Жидкий гелий поступает по трубопроводу 17 от гелиевого ожигателя в верхнюю ванну 11 с температурой 4.2 K и оттуда через регулировочный вентиль 10 сливается в промежуточную ванну 9 с температурой 1.2 K. Контроль уровня жидкого гелия в верхней ванне осуществляется по показаниям уровнемера. Испарившиеся в ванне 11 пары гелия возвращаются в ожигатель через 18. Объем сверхтекучего гелия в нижней ванне 5 контролируется при помощи криогенного вентилля 6 и гелиевого уровнемера 7, по сигналу которого происходит заполнение/опустошение нижней ванны 5 и ванны модели источника УХН 1. Нижняя ванна 5 и камера источника 1 представляют собой сообщающиеся сосуды, соединенные трубкой 4, с одинаковыми уровнями, в них поддерживается одинаковое давление.

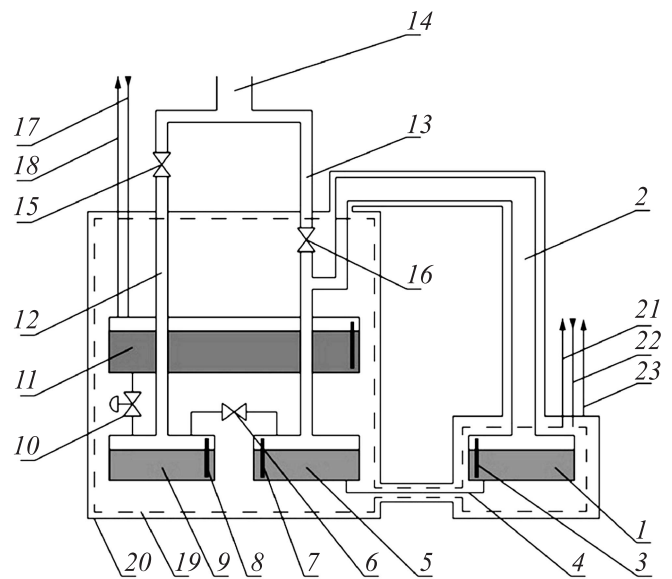


Рис. 3. Внутреннее исполнение криостата. 1 — модель источника, 2 — трубопровод откачки модели источника, 3 — уровнемер модели источника, 4 — труба заливки модели, 5 — нижняя ванна с температурой 1.2 K, 6 — вентиль подачи гелия в нижнюю ванну, 7 — датчик уровня жидкости в нижней ванне, 8 — датчик уровня жидкости в промежуточной ванне, 9 — промежуточная ванна с температурой 1.2 K, 10 — вентиль подачи гелия в промежуточную ванну, 11 — верхняя ванна с температурой 4.2 K, 12 — трубопровод вакуумной откачки промежуточной ванны, 13 — трубопровод вакуумной откачки нижней ванны и модели источника, 14 — общий трубопровод откачки, 15, 16 — запорные вентили системы вакуумной откачки, 17 — заливка верхней ванны жидким гелием с температурой 4.2 K, 18 — отвод паров гелия, 19 — тепловой экран с температурой 15 K, 20 — вакуумный кожух, 21 — отвод газообразного гелия от экрана, 22 — подача газообразного гелия на охлаждение теплового экрана, 23 — откачка вакуумного кожуха.

наковыми уровнями, в них поддерживается одинаковое давление.

Вся низкотемпературная часть окружена тепловым экраном 19 с температурой 15 K и заключена в вакуумную оболочку 20. Тепловой экран 19 охлаждается циркулирующим гелием от рефрижератора 21, 22. Вакуумная оболочка откачивается турбомолекулярным насосом через 23.

Из камеры 5 по трубопроводу 13 и из промежуточной ванны с жидким гелием по трубопроводу 12 производится откачка паров гелия. Вакуумный трубопровод 13 поддерживает в нижней ванне 5 давление, равное давлению в камере источника 1. Для снижения теплопритоков извне трубопроводы откачки 12, 13 проходят через ванну 11 с температурой 4.2 K, а затем объединяются в один трубопровод 14. Давление паров гелия в низкотемпературной части поддерживается вакуумной установкой на уровне 55 Pa при помощи пневматических вентилей 15, 16.

Запуск полномасштабной модели источника УХН

Вывод оборудования в рабочий режим состоит из пяти последовательно выполненных этапов:

1. Очистка и подготовка гелия.
2. Запуск рефрижератора TCF-50. Получение температуры защитных экранов $T = 15$ К.
3. Запуск ожижителя L-280. Получение жидкого гелия, заполнение ванн криостата.
4. Запуск очистителя. Очиститель используется для очистки поступающего на ожижение гелия.
5. Запуск вакуумной системы откачки. Получение температуры $T = 1$ К.

В общем этот процесс занимает 50 h. Большая часть времени отведена на охлаждение металлических конструкций внутри холодильных машин, криостата и модели источника УХН.

Была замерена производительность ожижителя и очистителя для определения возможности бесперебойной работы всего комплекса (замеры производились по расходу газообразного гелия). Экспериментальные данные приведены в табл. 1.

Таким образом за 2 h работы очистителя (1 h работы + 1 h регенерации) в ресивер поступает 120 m^3 чистого гелия, которого хватает более чем на 2.5 h бесперебойной работы.

Время, необходимое на заполнение ванны источника на 80%, составляет 3 h.

Произведены замеры испаряемости жидкого гелия в течении 10 h (табл. 2, рис. 4). Испаряемость гелия во всех ваннах получилась линейной и связана с теплопритоками по тепловым мостам конструкций криостата, а также из-за конвекции газообразного теплого гелия через откачные трубопроводы.

Для получения сверхнизких температур в комплексе применяется метод вакуумной откачки паров гелия. Для

Таблица 1. Производительность технологического комплекса по жидкому гелию

Производительность ожижителя	45 m^3 в h
Скорость очистки	120 m^3 в h
Время регенерации очистителя	55 min

Таблица 2. Замеры испаряемости жидкого гелия

	cm/h	g/h	l/h (жидкого)	m^3 /h (газ)
Верхняя ванна	0.1938	80.2	0.642	0.45
Промежуточная ванна	0.1576	24.7	0.198	0.14
Сливная ванна + источник	0.1562	47.3	0.378	0.265
Всего		152.2	1.18	0.855

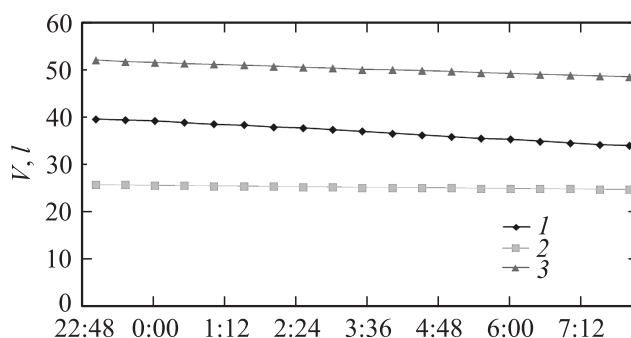


Рис. 4. Замеры испаряемости жидкого гелия. 1 — объединенные сливная ванна и ванна модели источника УХН, 2 — верхняя ванна, 3 — промежуточная ванна.

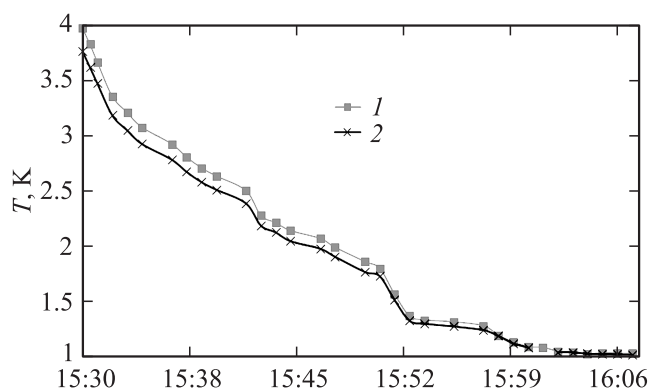


Рис. 5. Получение температуры $T = 1$ К. 1 — температура в промежуточной ванне, 2 — температура в ванне модели источника УХН.

этого последовательно запускаются форвакуумная группа насосов, состоящая из двух GS600 и одного EH4200, и насосы большой мощности — четыре HV30000. Перед пуском каждого форвакуумного насоса делается пятиминутная пауза, необходимая откачному компрессору BAUER для закачки гелия из газгольдера в баллоны.

В общей сложности для получения температуры 1.021 К необходимо 36 min (рис. 5). Расход гелия в промежуточной ванне составляет 141 (43%), в сливной ванне и ванне источника 201 (42%).

Проведение эксперимента. Результаты

Цель эксперимента: определить основные термодинамические параметры сверхтекучего гелия при подведении различной тепловой нагрузки (0, 15, 30, 60 W) к ванне модели источника УХН. Данная тепловая нагрузка полностью моделирует тепловую нагрузку от реактора ВВР-М, работающего на разном уровне мощности.

Нагрузка подается от двух источников постоянного тока с выдержкой 10 min на каждом уровне мощности. 10 min оказывается достаточным для стабилизации температуры внутри ванн криостата и ванны источника

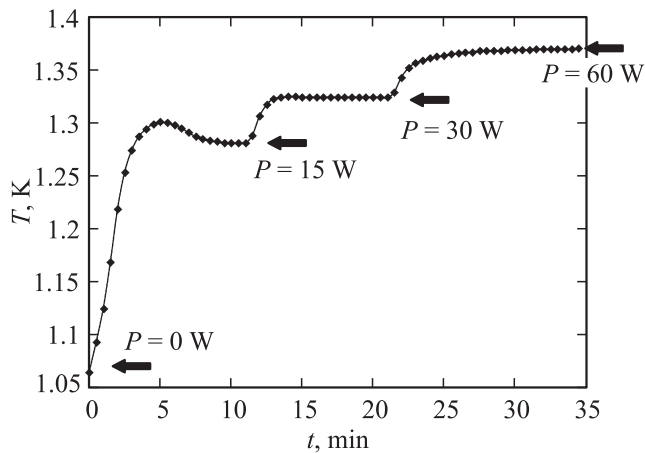


Рис. 6. Температурная зависимость от подаваемой тепловой нагрузки на модель источника УХН.

Таблица 3. Результаты эксперимента на полномасштабной модели источника УХН

Тепловая нагрузка на ванну источника УХН, W	Температура в ванне источника УХН, К	Нагрузка на вакуумный насос, %max
0	1.064	13
15	1.282	24.5
30	1.325	36.4
60	1.371	58.8

УХН. В результате проведенного эксперимента была получена температурная зависимость от подаваемой тепловой нагрузки на сверхтекучий гелий. При этом велись замеры таких параметров, как давление на входе в вакуумный насос и нагрузка на вакуумные насосы. Результаты эксперимента приведены на рис. 6 и в табл. 3.

Результаты показывают нелинейный рост температуры сверхтекучего гелия в ванне модели источника УХН от подаваемой тепловой нагрузки. Главным фактором в определении температуры в источнике является давление насыщенных паров гелия, которое складывается из давления на входе в вакуумный насос и гидравлического сопротивления откачных трубопроводов. При этом зависимость температуры от давления гелия при $1\text{ К} < T < 1.4\text{ К}$ хорошо описывается уравнением $T = 0.7217 \cdot P^{0.1164}$ [10], что и приводит к первоначальному скачку температуры при подаваемой тепловой мощности $P = 15\text{ W}$.

Заключение

В результате работ, проведенных на полномасштабной модели источника УХН, были запущены основные установки технологического комплекса: гелиевый ожижитель L-280, гелиевый рефрижератор TCF-50, вакуумная

система откачки. Режимы работы всего оборудования согласованы между собой с целью получения сверхтекучего гелия и удержания сверхнизких температур (порядка 1 К) при подаваемой тепловой нагрузке.

В результате экспериментов на полномасштабной модели источника УХН были получены реальные температуры сверхтекучего гелия при тепловой нагрузке вплоть до 60 W, в то время как расчетное значение тепловой нагрузки на реакторе ВВР-М оценивается в 20 W.

Производительности ожижителя достаточно для того, чтобы за время опустошения верхней ванны криостата почистить и ожижить необходимое количество гелия для бесперебойной работы технологического комплекса.

Получена температурная зависимость от подаваемой тепловой нагрузки. Наибольшая температура гелия $T = 1.371$ была зафиксирована при тепловой нагрузке 60 W. Таким образом, запас мощности вакуумной системы откачки составляет более чем 200%. Даже при столь больших нагрузках на модель источника УХН гелий продолжает оставаться в сверхтекучей фазе.

Была экспериментально обоснована возможность установки источника УХН на реактор ВВР-М.

Исследование выполнено в ФГБУ «ПИЯФ» за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00105).

Список литературы

- [1] Серебров А.П. // Вестник РАН. 2009. Т. 79. № 1. С. 23–35.
- [2] Ахизер А.И., Померанчук И.Я. // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 391.
- [3] Golub R., Jewell C., Ageron P., Mampe W. et al. // Phys. B. Condensed Matter. 1983. Vol. 51. P. 187.
- [4] Yoshiki H., Sakai K., Ogura M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68. P. 1323.
- [5] Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г. и др. // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2015. Т. 2. № 60. Вып. 1. С. 27–41.
- [6] Serebrov A.P. // Crystallography Rep. 2011. Vol. 56. N 7. P. 1230–1237.
- [7] Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г. и др. // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2015. Т. 2. № 60. Вып. 1. С. 27–41.
- [8] Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г. и др. // Кристаллография. 2016. Т. 61. № 1. С. 157–162.
- [9] Захаров А.А., Серебров А.П. Препринт ПИЯФ-2812, Гатчина, 2009. 24 с.
- [10] Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоатомиздат, 1973. С. 104–105.