

УДК 537.626:538.945

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ОНДУЛЯТОР С ПЕРИОДОМ 15.6 мм И ПОЛЕМ 1.2 Тл

© 2023 г. В. А. Шкаруба^{1, 2, *}, А. В. Брагин¹, А. А. Волков^{1, 2}, А. И. Ерохин¹, А. В. Зорин¹,
Ф. П. Казанцев¹, П. В. Каноник¹, Н. А. Мезенцев^{1, 2}, А. Н. Сафронов¹, А. А. Седов¹,
О. А. Тарасенко¹, С. В. Хрущев^{1, 2}, В. М. Цуканов^{1, 2}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук”,
Новосибирск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Федеральный исследовательский центр Институт катализа имени Г.К. Борескова
Сибирского отделения Российской академии наук”,
Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов”, Кольцово, Россия

*E-mail: shkaruba@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 15.12.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл, созданный в ИЯФ СО РАН, был испытан в собственном криостате на основе косвенного охлаждения с нулевым расходом гелия. Представлены основные характеристики и особенности конструкции магнитной и криогенной систем этого вставного устройства. Описаны результаты измерений магнитного поля. Обсуждаются особенности работы криогенной системы в различных режимах.

DOI: 10.31857/S0367676522701289, EDN: ABVVMV

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее востребованными устройствами для генерации синхротронного излучения на современных источниках СИ являются сверхпроводящие ондуляторы. Именно сверхпроводящие технологии позволяют достигать наибольшей величины уровня магнитного поля при минимальном периоде, по сравнению с аналогичными устройствами на постоянных магнитах [1–3]. Это дает возможность получать на источниках СИ с энергией до 3 ГэВ спектральные характеристики излучения, которые не уступают по яркости и величине потока фотонов машинам с более высокой энергией. Сверхпроводящий 119-периодный ондулятор с периодом 15.6 мм и полем 1.2 Тл был создан в ИЯФ СО РАН и испытан в собственном криостате на основе косвенного охлаждения с нулевым расходом гелия. Магнитная структура ондулятора основана на чередующихся активных и нейтральных полюсах [4, 5]. На основе измерений магнитного поля была рассчитана величина фазовой ошибки, которая не превышает 3 градусов, что является необходимым условием работоспособности ондулятора. Основные параметры ондулятора представлены в табл. 1.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ОНДУЛЯТОРА

Магнитная система ондулятора, создающая вертикальное магнитное поле с периодически изменяющейся полярностью, конструктивно состоит из верхней и нижней половинки и основана на чередующихся активных и нейтральных полюсах. Такая схема была получена преобразованием из обычной магнитной структуры, где все полюса состоят из обмоток типа горизонтальный рейстрек, намотанных на железный сердечник и расположенных напротив друг друга. Так как на прямолинейных участках такой структуры токи в соседних обмотках протекают сонаправленно, то эти участки были объединены в единые обмотки двойной толщины и замкнуты снаружи поочередно то в одну, то в другую сторону. Магнитное поле всех активных полюсов на каждой из половинок магнита направлено навстречу друг другу и обе половинки сдвинуты относительно друг друга на полпериода. Таким образом, напротив каждого активного полюса, имеющего собственную обмотку, расположенного на одной из половинок магнита, находится нейтральный полюс другой половинки, как показано на 3-D модели на рис. 1а. При этом величина периода 15.6 мм складывается из ширины одного активного полюса

Таблица 1. Основные параметры ондулятора

Параметр	Значение
Номинальное магнитное поле, Тл	1.2
Период вигглера, мм	15.6
Межполюсный зазор, мм	8
Вертикальная апертура для пучка, мм	6
Горизонтальная апертура для пучка, мм	60
Число периодов	119
Магнитная длина, мм	~1900
Длина между фланцами	~2500
Ток в обмотке, А	~500
Мощность излучения (при $B = 1.2$ Тл, $I = 0.4$ А, $E = 3$ ГэВ), кВт	~7
Горизонтальный угол излучения, мрад	± 0.32
Среднеквадратичная фазовая ошибка, град	<3
Максимальное значение параметра отклонения K	~1.73

размером 11.4 мм и одного нейтрального полюса шириной 4.2 мм. На рис. 1б показан внешний вид готовой магнитной структуры с чередующимися активными и нейтральными полюсами.

Основным элементом магнитной структуры является сверхпроводящая катушка, намотанная

на железном сердечнике, конструкция которой была оптимизирована для получения максимального поля на орбите пучка. Внутри межполюсного зазора высотой 8 мм на расстоянии 0.5 мм располагается вакуумная камера пучка с толщиной стенки 0.5 мм. Таким образом, вертикальная апертура вакуумной камеры для электронного пучка имеет размер 6 мм. Использовался сверхпроводящий Nb–Ti/Cu провод диаметром 0.55 мм, включая лаковую изоляцию, имеющий критический ток 260 А в поле 7 Тл. Оптимальная обмотка с витками, расположенными в шахматном порядке, состоит из 7 слоев и 12 витков в каждом полном слое. Максимальное поле в критической области обмотки при токе 500 А составляет 4.25 Тл, что соответствует уровню поля 1.2 Тл на оси ондулятора.

Магнитная структура ондулятора состоит из 119 основных периодов с номинальным магнитным полем на орбите величиной 1.2 Тл, а также боковых катушек с полем 3/4 и 1/4 от величины основного поля, служащих для зануления интегралов поля и замыкания орбиты пучка. Для защиты обмоток при срыве сверхпроводимости использованы цепочки последовательно соединенных диодов и резисторов, подключенных параллельно основным обмоткам. На рис. 2а и 2б представлен внешний вид половинки магнита в процессе сборки и внешний вид магнита ондулятора в сборе, соответственно.

Схема с нейтральными и активными полюсами позволяет вдвое уменьшить количество катушек в ондуляторе. Также вдвое уменьшается и число электрических контактов между катушками и, соответственно, снижается мощность, выделяемая на этих соединениях при протекании тока. Еще одно преимущество данной схемы состоит в том, что, действие поперечных сил, которые расталкивают две соседних обмотки между собой в магните обычной конфигурации, в

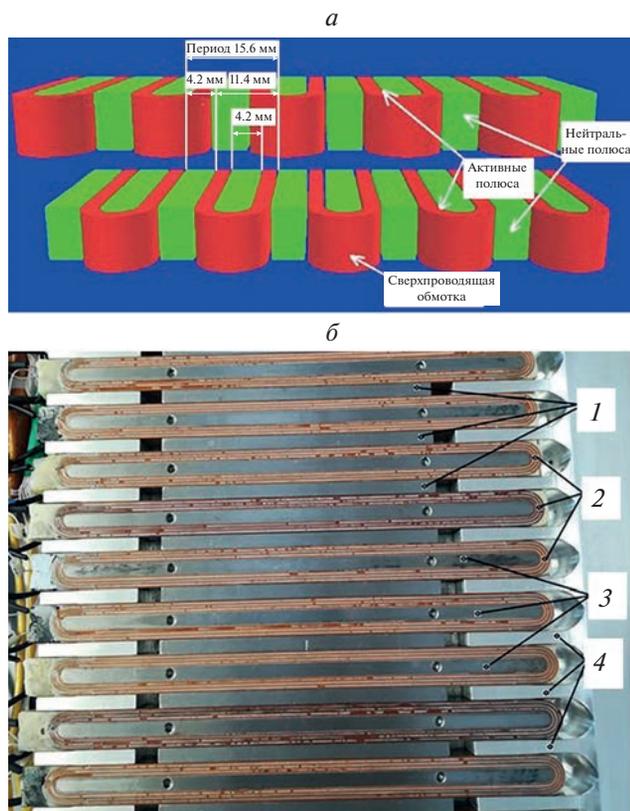


Рис. 1. Магнитная структура ондулятора с чередующимися активными и нейтральными полюсами: 3D модель (а), внешний вид (б).

данной схеме уравнивается, так как силы направлены внутрь объединенной обмотки двойной толщины. Таким образом, сверхпроводящие обмотки становятся более устойчивыми к потере сверхпроводимости благодаря ограничению движения витков провода под действием ponderomotive сил. Это позволяет устанавливать катушки в пазы магнита без использования специального механического бандажирования, необходимого в конструкции с обычной конфигурацией. Верхняя и нижняя половинка магнита изготовлена из алюминиевого сплава 6063, имеющего высокую теплопроводность в рабочем диапазоне температур ~ 3 К, что важно для сухого магнита с косвенным охлаждением, работающего в вакууме. Конструктивно данная схема с высокой точностью обеспечивает стабильный размер периода на всей длине ондулятора, что минимизирует вклад погрешности длины периода в величину фазовой ошибки.

КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА ОНДУЛЯТОРА

Криогенная система ондулятора с нулевым расходом гелия работает на принципе косвенного охлаждения, при котором магнит располагается не в сосуде с жидким гелием, а в вакууме и охлаждение всех элементов криостата производится посредством криокулеров [6]. Это дает возможность убрать из магнитного зазора камеру гелиевого сосуда и использовать только одну вакуумную камеру для пролета пучка и, соответственно, увеличить уровень магнитного поля за счет уменьшения величины магнитного зазора.

Принцип работы криостата с нулевым расходом гелия, основан на перехвате всех притоков тепла снаружи криостата, а также тепла, выделяемого внутри криостата от протекающего тока и воздействия электронного пучка, на соответствующие ступени криокулеров. В криостате используется два криокулера Sumitomo SRDK-415D и два криокулера Sumitomo SRDK-408S. Рабочая температура магнита на уровне ~ 3.5 К поддерживается за счет циркуляции жидкого гелия по каналам, просверленным в верхней и нижней половинках магнита. При этом жидкий гелий, находится в небольшом сосуде объемом ~ 30 л, расположенном вне магнита в защитном вакууме криостата. Охлаждение и реконденсация испарившегося гелия производится двумя вторыми ступенями криокулеров SRDK-415D, имеющими мощность 1.5 Вт при температуре 4.2 К, через медные теплообменники, встроенные гелиевый сосуд.

Ввод тока в обмотки магнита производится посредством комбинированных тоководов, состоящих из последовательно соединенных между собой латунных стержней и керамических ВТСП тоководов, охлаждаемых соответствующими ступенями криокулеров SRDK-415D. При этом приток

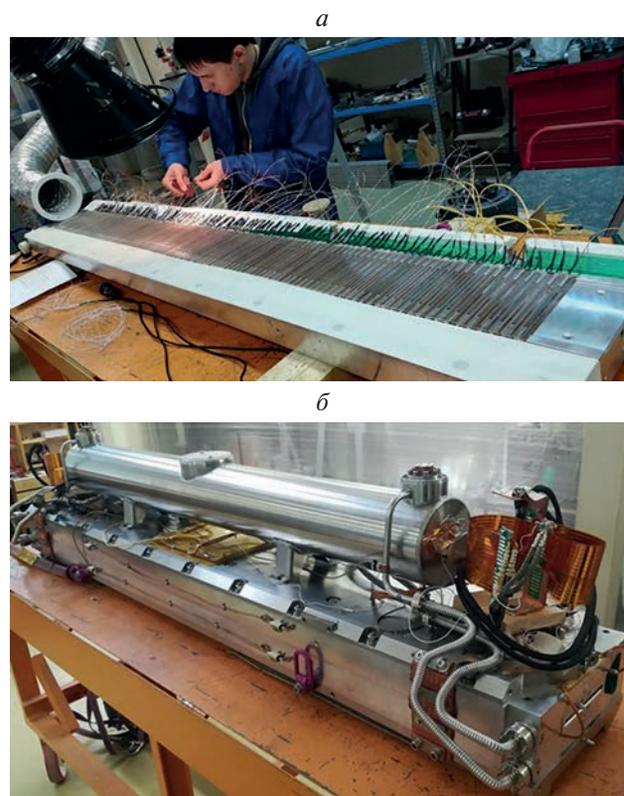


Рис. 2. Внешний вид магнита ондулятора: половинки магнита в процессе сборки (а), магнит в сборе с установленным гелиевым сосудом (б).

тепла, приходящий снаружи по оптимизированному латунному тоководу, а также джоулево тепло, выделяемое при протекании тока, перехватывается в месте контакта с внутренним тоководом первой ступени криокулера с температурой 60 К. Нижняя часть внутреннего ВТСП токовода охлаждается 4 К ступенью криокулера. Охлаждение медного теплового экрана криостата производится одновременно всеми четырьмя 60 К ступенями криокулеров с общей холодильной мощностью 180 Вт. На рис. 3а представлена конструкция криостата на основе косвенного охлаждения.

Камера пучка, изготовленная методом экструзии из алюминиевого сплава 6063, имеет толщину стенок 0.5 мм и расположена с зазором 0.5 мм относительно поверхности сверхпроводящих полюсов. Внутренняя апертура вакуумной камеры имеет размер 6 мм по вертикали и 60 мм по горизонтали. Для увеличения эффективности отвода тепла, наводимого в стенках камеры токами изображения и синхротронным излучением, используются дополнительные медные тепловоды, охлаждаемые вторыми ступенями нижних криокулеров SRDK-408S с минимальной температурой 8 К. Сечение магнитного зазора с вакуумной камерой внутри показано на рис. 3б.

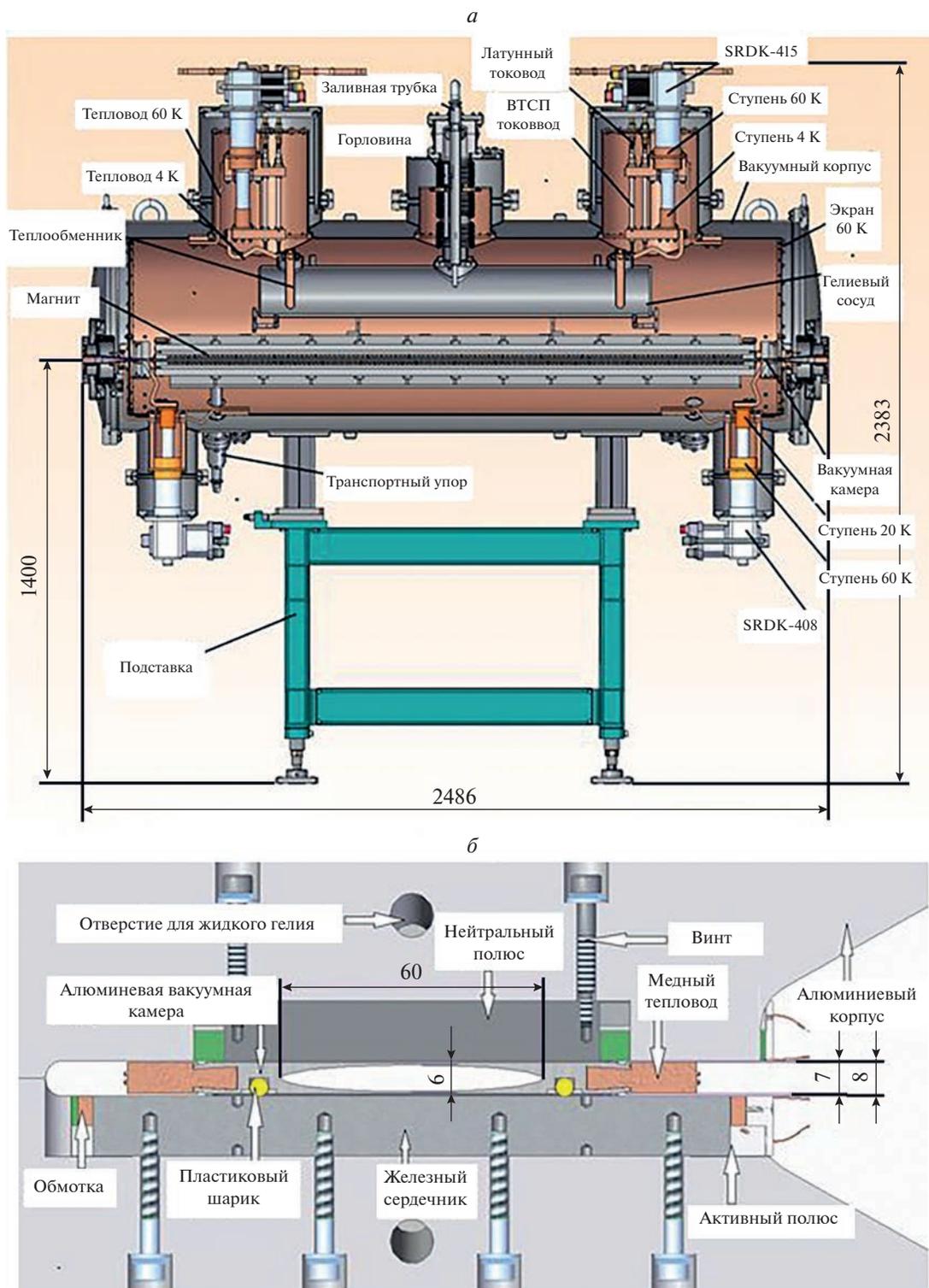


Рис. 3. Конструкция криостата ондулятора на основе косвенного охлаждения: продольное сечение криостата (а), сечение магнитного зазора с вакуумной камерой внутри (б).

Для предварительного охлаждения магнита до рабочих температур используется холодильная мощность первых ступеней криокулеров SRDK-415D с

температурой 60 К. В качестве тепловода используются две азотные тепловые трубки сифонного типа, соединяющие ступени криокулера с магни-

том, каждая из которых обеспечивает отвод тепла величиной до 100 Вт [7]. При достижении температуры замерзания азота ~ 64 К тепловая связь между магнитом и криокулером автоматически прерывается. Для предотвращения преждевременного замерзания тепловых трубок и повышения эффективности их работы используются резистивные нагреватели, управляемые по специальному алгоритму на основе измерения температуры азота. По достижению минимально возможной температуры с помощью тепловых трубок дальнейшее охлаждение магнита происходит только за счет циркуляции гелия, охлаждаемого вторыми ступенями криокулеров SRDK-415D через медные теплообменники в гелиевом сосуде.

Особенностью работы данного криостата является полный отказ от использования жидких хладагентов, как в процессе захолаживания, так и во время длительной эксплуатации. Для предварительного охлаждения и достижения рабочего температурного режима используется только газообразный гелий, который подается в гелиевый сосуд непосредственно из баллона со сжатым гелием. При подаче газообразного гелия из баллона с помощью редуктора поддерживается постоянное абсолютное давление на уровне ~ 1.8 бар. Криостат оборудован клапаном аварийного сброса давления, срабатывающий при давлении в сосуде ~ 2 бар. По мере понижения температуры плотность гелия в криостате постепенно увеличивается и, по достижению соответствующей температуры, начинается ожидение гелия и повышение его уровня в гелиевом сосуде. При этом всего одного стандартного баллона с газообразным гелием, содержащего ~ 5.7 м³ газа, что эквивалентно ~ 8 л жидкого гелия, достаточно для охлаждения магнита до рабочей температуры и достижения уровня гелия величиной $\sim 10\%$.

Общий расчетный приток тепла в криостат на холодную массу с температурой 4.2 К составляет ~ 2 Вт, а соответствующая полная холодильная мощность вторых ступеней криокулеров SRDK-415D равна ~ 3 Вт. Поэтому избыточная охлаждающая мощность величиной ~ 1 Вт в тепловом балансе криостата приводит к переохлаждению магнита до температуры ~ 3.5 К и соответственно понижению абсолютного давления в гелиевом сосуде, отсеченном от наружной атмосферы, до ~ 0.7 бар. Таким образом, криостат не только не расходует жидкий гелий, но и работает при давлении ниже давления наружной атмосферы. Работа при пониженной температуре не только повышает надежность работы криостата и увеличивает ресурс работы криокулеров за счет снижения тепловой нагрузки, но и дает возможность увеличить уровень магнитного поля благодаря смещению токовой характеристики сверхпроводящего провода. Кроме того, наличие отрицательного давления создает дополнительный буферный объем в

гелиевом сосуде, что позволяет сохранять постоянным объем гелия в криостате во время срыва сверхпроводимости, так как давление в сосуде при этом не превышает давления срабатывания аварийного клапана ~ 2 бар. В таком режиме криогенная система ондулятора позволяет работать автономно внутри биозащиты синхротрона в течение нескольких лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ.

В процессе изготовления ондулятора было проведено несколько циклов испытаний полноразмерного 119-периодного ондулятора в собственном криостате с косвенным охлаждением. Особенность проведения измерений магнитного поля в таком ондуляторе состоит в том, что при столь малом “холодном” межполюсном зазоре величиной 8 мм, соответствующая вертикальная апертура вакуумной камеры для пучка, равная всего 6 мм, не позволяет разместить в ней еще и измерительную камеру с “теплой” апертурой, достаточной для установки измерительной каретки с датчиком Холла. Поэтому для проведения магнитных измерений собственная камера была заменена на специально изготовленную измерительную алюминиевую камеру с доступной вертикальной апертурой 5.5 мм, открытую на атмосферу. Для тепловой изоляции измерительной камеры в доступном зазоре между сверхпроводящими обмотками и наружной атмосферой, равном всего 0.75 мм, был помещен тепловой экран из медной фольги толщиной 0.2 мм с температурой ~ 20 К, а также несколько слоев экранно-вакуумной изоляции с нейлоновыми дистанцирующимися проставками. Несмотря на наличие тепловой изоляции, температура внутри “теплого” зазора измерительной камеры не поднялась выше 50 К, что создавало дополнительные трудности для проведения магнитных измерений датчиком Холла и потребовало вводить дополнительную коррекцию измерений, учитывающую реальную температуру.

Для исключения неконтролируемого нагрева сверхпроводящих обмоток ондулятора со стороны измерительной камеры первое включение ондулятора было проведено вообще без камеры с вакуумированным зазором между полюсами магнита. В процессе тренировки при быстром подъеме поля в течение 5 мин со скоростью ~ 2 А/с удалось достичь максимального уровня поля 1.26 Тл. Однако уровень поля, обеспечивающий долговременную стабильную работу, не превышал 1.15 Тл. При более высоких полях происходила неконтролируемая потеря сверхпроводимости через несколько минут после установки поля. Был обнаружен эффект пульсации температуры на контактах между последовательно соединенными обмотками, который возникал при превышении

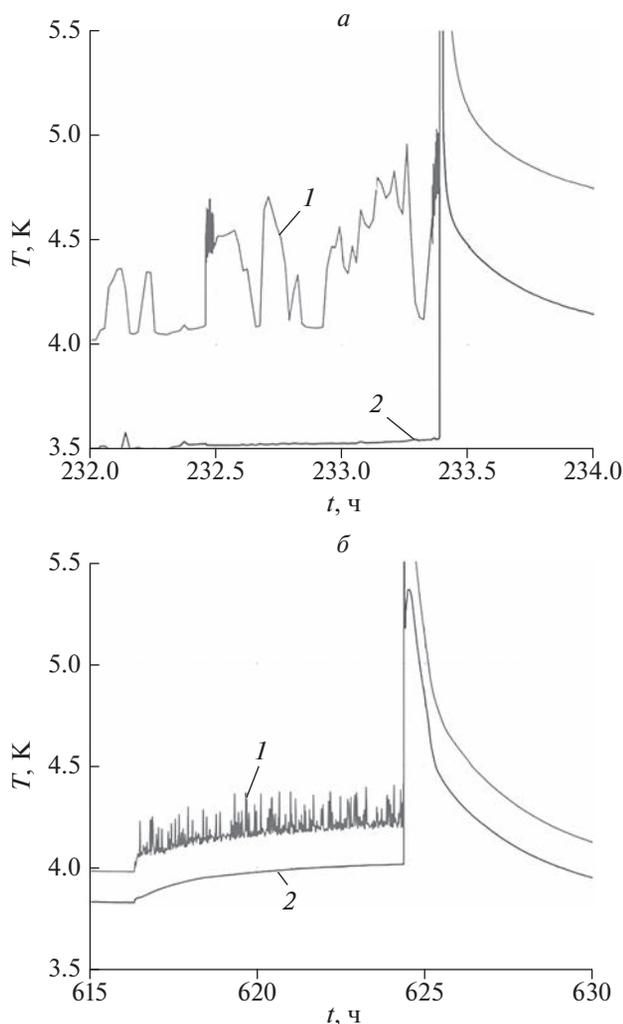


Рис. 4. Поведение температуры Nb–Ti контакта (1) и магнита (2): рост температуры контакта до 5 К без дополнительного охлаждения (а), стабилизация температуры на 4.3 К с дополнительным охлаждением (б).

некоторого порогового значения тока. Так, при достижении величины тока более, чем ~ 250 А, температура контакта плавно повышалась с 4 К и начинала пульсировать с периодом ~ 2 –4 с с амплитудой до 5 К. Дальнейшее медленное увеличение тока приводило к общему нагреву магнита и срыву сверхпроводимости. Так как остаточное сопротивление контактов между обмотками, изготовленных методом холодной сварки сверхпроводящих жил, не превышает $\sim 10^{-10}$ Ом, то выделение джоулева тепла при токе 500 А не должно было превышать ~ 10 мВт. Однако обнаруженный эффект пульсации температуры мог приводить к дополнительному неконтролируемому нагреву. Для устранения обнаруженного эффекта, вероятно, связанного со скачками магнитного потока внутри соединений сверхпроводящих проводов, было сделано дополнительное охлаждение каж-

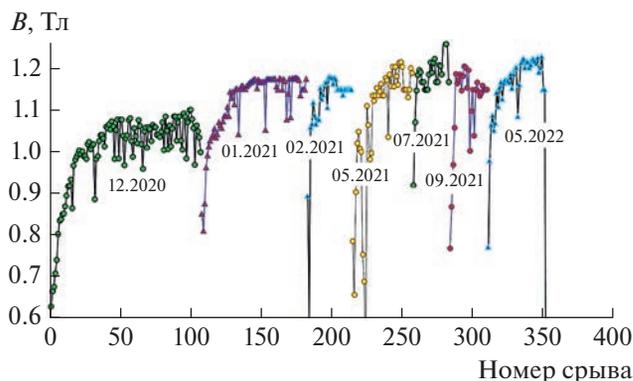


Рис. 5. График тренировки магнита ондулятора для получения максимального уровня магнитного поля.

дого из ~ 240 контактов с использованием электрически изолированных медных теплопроводов, отводящих тепло непосредственно на корпус магнита. Следующее испытание ондулятора, проведенное уже с установленной измерительной камерой, показало, что хотя температурные пульсации и сохранились, но уровень температур на контакте снизился до 4.3 К, что обеспечило стабильную работу на поле 1.22 Тл в течение нескольких суток. Поведение температуры контакта до и после дополнительного охлаждения представлены на рис. 4а и 4б, соответственно. График тренировки магнита на получение максимального магнитного поля приведен на рис. 5. Напряжения, возникающие на обмотках ондулятора при срывах сверхпроводимости длительностью не более 10 мс не превышали безопасных 150 В.

ФАЗОВАЯ ОШИБКА

Критерием качества ондулятора является величина фазовой ошибки, характеризующая отличие магнитного поля реального устройства от идеального синусоидального поля, которая должна быть не более 3 градусов. При использовании ондуляторов для генерации излучения на современных источниках СИ, имеющих малый эмиттанс и энергетический разброс, значение этого параметра особенно возрастает, так как большая величина фазовой ошибки будет ограничивать яркость излучения на высоких гармониках и не позволит в полной мере использовать возможности накопителя.

Качество магнитного поля ондулятора определяет величину фазовой ошибки, которая возрастает с увеличением разницы амплитуды поля между полюсами, а также с изменением величины периода на длине ондулятора. Различие амплитуды поля возрастает не только при изменении магнитного зазора, но и при разбросе геомет-

рических размеров обмоток, а также неточности установки обмоток в каркасе магнита. По оценкам эти отличия не должны превышать 10–20 мкм. Неточности в размере периода были минимизированы на всей длине магнита, так как пазы для установки катушек были профрезерованы именно с такой точностью. Однако обеспечить такую же повторяемость в изготовлении самих сверхпроводящих полюсов не представляется возможным. Поэтому величина фазовой ошибки ондулятора, вычисленная на основе магнитных измерений датчиком Холла сразу после изготовления ондулятора, оказалась более 5 градусов.

Для снижения величины фазовой ошибки было сделано несколько последовательных перестановок полюсов между собой на основе измерения амплитуд магнитного поля. Целью первой перестановки было получение плавного изменения магнитного зора вдоль всего магнита. Затем были сделаны локальные перестановки полюсов с сильно различающимися амплитудами поля между собой. Однако сильное взаимное влияние магнитного поля соседних катушек не позволило точно определять амплитуду поля на каждом отдельном полюсе, поэтому величину фазовой ошибки не удалось снизить менее чем до 4 градусов. Дальнейшие попытки улучшить качество магнитного поля путем локальных изменений магнитной структуры не привели к заметному снижению величины фазовой ошибки, поэтому был предложен новый способ для ее коррекции.

Учитывая, что ошибки в амплитудах поля между полюсами не превышали $\sim 1\%$, все последовательно соединенные обмотки на каждой из половинок магнита были разбиты на 12 одинаковых участков, каждый из которых был запитан отдельным корректирующим источником тока, величиной до 5 А, что составляет $\sim 1\%$ от максимального рабочего тока 500 А. Таким образом, используя возможность независимо изменять токи в каждой группе катушек, был предложен следующий алгоритм коррекции фазовой ошибки. В структуре с активными и нейтральными полюсами магнитное поле на всех полюсах верхней половинки магнита направлено вниз, к оси ондулятора, а на нижней половинке, соответственно, вверх. Поэтому появляется возможность независимо изменять величину поля одинаково на всех полюсах каждого из участков коррекции. На первом этапе на каждом из двух участков верхней и нижней половинки, расположенных друг напротив друга, одновременно создавались корректирующие магнитные поля, либо сонаправленные, либо противоположные основному направлению поля на каждом из этих участков. Это позволило минимизировать различие уровней магнитного поля между всеми 12 корректируемыми участка-

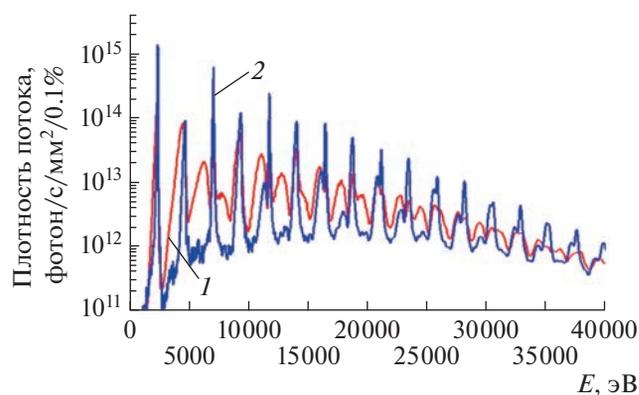


Рис. 6. Спектры излучения, рассчитанные программой SPECTRA на основе нескорректированного (1) и скорректированного магнитного поля (2) ондулятора ($E = 3$ ГэВ, $I = 400$ мА, $\epsilon_x = 75$ пм · рад, $B = 1.2$ Тл).

ми. На следующем этапе корректирующие поля на противоположных участках создавались уже сонаправлено между собой, либо вниз, либо вверх, что создавало дополнительные дипольные поля на оси ондулятора, позволяющие локально корректировать орбиту пучка на каждом из 12 участков. Таким образом, на каждом из этих двух этапов был осуществлен подбор корректирующих токов, суперпозиция которых позволила одновременно скорректировать как уровень магнитного поля, так и орбиту пучка в ондуляторе. В результате коррекции величина интегральной фазовой ошибки, вычисленной на основе скорректированного распределения магнитного поля вдоль ондулятора, составила 2.9 градуса, а локальная фазовая ошибка снизилась до 1.9 градуса. На рис. 6 представлены спектры излучения, рассчитанные программой SPECTRA [8] на основе нескорректированного и скорректированного магнитного поля ондулятора для энергии электронного пучка 3 ГэВ, тока 0.4 А и эмиттанса 75 пм · рад, из которых видно, что спектральные пики излучения после коррекции магнитного поля значительно выросли на всех гармониках.

Питание обмоток ондулятора корректирующими токами осуществлялась через специальные комбинированные токовводы, состоящие из последовательно соединенной медной проволоки, оптимизированной на протекание тока до ~ 5 А, ВТПС ленты и Nb–Ti проволоки. Места соединения всех участков комбинированных токовводов между собой охлаждались через изолированные теплоперехваты соответствующими ступенями криокулеров с температурами 60, 20 и 4 К. Внешний вид комбинированных токовводов для ввода токов коррекции фазовой ошибки представлен на рис. 7.

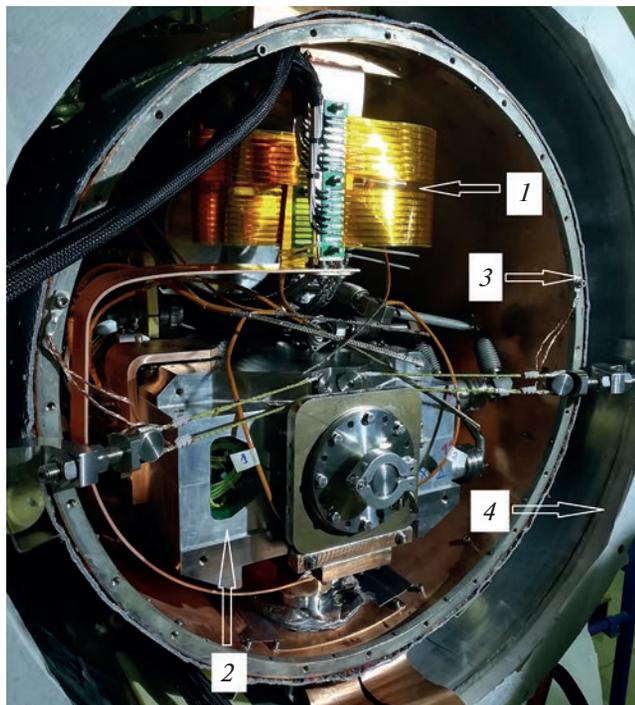


Рис. 7. Внешний вид конструкции комбинированных тоководов для ввода токов коррекции фазовой ошибки: 1 – тоководы, 2 – магнит, 3 – экран, 4 – корпус криостата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полноразмерный 119-полюсный сверхпроводящий ондулятор с периодом 15.6 мм, уровнем магнитного поля 1.2 Тл и апертурой для пучка 6 мм был успешно испытан в собственном крио-

стате на основе косвенного охлаждения. В ходе испытания был получен стабильный долговременный уровень магнитного поля величиной более 1.2 Тл, предложен и осуществлен метод коррекции, позволяющий достигать величины фазовой ошибки менее 3 градусов, а также продемонстрирована надежная долговременная работа криогенной системы с косвенным охлаждением, позволяющая работать автономно внутри биозащиты накопителя в течение нескольких лет.

Работа выполнена в рамках соглашения с Минобрнауки России № 075-15-2021-1359 и частично при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № FWUS-2021-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gluskin E., Mezentsev N.* // In: Synchrotron light sources and free-electron lasers. Cham: Springer, 2020.
2. *Kasa M., Borland M., Emery L. et al.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2020. V. 23. No. 5. Art. No. 050701.
3. *Casalbuoni S., Blomley E., Glamann N. et al.* // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1741. Art. No. 020002.
4. *Mezentsev N.A., Khrushchev S.V., Shkaruba V.A. et al.* // Proc. RuPAC'16. (St. Petersburg, 2016). Art. No. TUCAMH01.
5. *Bragin A., Khrushchev S., Lev V. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. V. 28. No. 4. Art. No. 4101904.
6. *Bragin A., Gusev Ye., Khrushchev S. et al.* // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 54.
7. *Tsukanov V.M., Khrushchev S.V., Mezentsev N.A. et al.* // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. Art. No. 020018.
8. *Tanaka T., Kitamura H.* // J. Synchrotron Radiat. 2001. V. 8. No. 6. P. 1221.

Superconducting undulator with period of 15.6 mm and magnetic field of 1.2 T

V. A. Shkaruba^{a, b, *}, A. V. Bragin^a, A. A. Volkov^{a, b}, A. I. Erokhin^a, A. V. Zorin^a, F. P. Kazantsev^a, P. V. Kanonik^a, N. A. Mezentsev^{a, b}, A. N. Safronov^a, A. A. Sedov^a, O. A. Tarasenko^a, S. V. Khrushchev^{a, b}, V. M. Tsukanov^{a, b}

^a Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

^b Synchrotron Radiation Facility – Siberian Circular Photon Source “SKIF”, Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Koltsovo, 630559, Russia

*e-mail: shkaruba@mail.ru

A superconducting undulator with a period of 15.6 mm and a field of 1.2 T created at Budker INP SB RAS was tested in its own cryostat based on indirect cooling with zero helium consumption. The report presents the main characteristics and design features of the magnetic and cryogenic systems of this insertion device. The results of measurements of the magnetic field are presented and the features of the operation of the cryogenic system in various modes are shown.