

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 537.626:538.945

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ВИГГЛЕРАМ  
И ОНДУЛЯТОРАМ ДЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ СКИФ<sup>1</sup>

© 2025 г. В. А. Шкаруба<sup>a, b, \*</sup>, А. В. Брагин<sup>a</sup>, А. А. Волков<sup>a, b</sup>, Е. А. Гусев<sup>a</sup>, А. И. Ерохин<sup>a</sup>,  
А. В. Зорин<sup>a</sup>, Ф. П. Казанцев<sup>a</sup>, П. В. Каноник<sup>a</sup>, Н. А. Мезенцев<sup>a, b</sup>, А. Н. Сафронов<sup>a</sup>,  
А. А. Седов<sup>a</sup>, О. А. Тарасенко<sup>a</sup>, С. В. Хрущев<sup>a, b</sup>, В. М. Цуканов<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

<sup>b</sup> Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов” Института катализа  
им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630559, Новосибирская обл., р. п. Кольцово, пр. Никольский, 1

\* e-mail: shkaruba@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 23.11.2023 г.

После доработки 01.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

Сверхпроводящие вставные устройства (вигглеры и ондуляторы), создаваемые в ИЯФ СО РАН, будут основными устройствами для генерации синхротронного излучения на строящемся синхротроне СКИФ. Представлено обоснование выбора рабочих параметров, основные характеристики и особенности конструкции этих устройств, а также текущий статус работ по их созданию.

DOI: 10.7868/S3034564225070233

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Использование сверхпроводящих вставных устройств (вигглеров и ондуляторов) позволяет получать на относительно небольших источниках синхротронного излучения (СИ) с энергией около 3 ГэВ синхротронное излучение, не уступающие по характеристикам излучению из поворотных магнитов на накопителях с высокой энергией до 6 ГэВ. На источнике СИ СКИФ [1] с энергией 3 ГэВ основными устройствами генерации фотонов являются сверхпроводящие многополюсные вставные устройства со знакопеременным магнитным полем – вигглеры [2] и ондуляторы [3]. Использование сверхпроводящих технологий дает возможность получать более высокий уровень магнитного поля при минимальном периоде магнитной структуры,

по сравнению с аналогичными устройствами на постоянных магнитах, что позволяет разместить на доступной длине промежутка большее число электромагнитных полюсов для увеличения интенсивности генерируемого излучения. Интенсивность излучения из вигглеров возрастает пропорционально количеству полюсов, а для ондуляторов эта характеристика растет квадратично. В первой очереди строительства источника СКИФ планируется создать пять экспериментальных станций, основанных на излучении из сверхпроводящих вставных устройств, в том числе два вигглера и три ондулятора. Магнитные параметры каждого из этих устройств были оптимизированы для выполнения конкретных пользовательских задач. Основные характеристики этих устройств представлены в табл. 1.

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

## 2. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВИГГЛЕРЫ

Для проведения экспериментов на синхротронном излучении в высокоэнергетичном рентгеновском диапазоне (примерно до 150 кэВ) используются многополюсные вигглеры с высоким уровнем поля. В этом случае траектория пучка электронов отклоняется на углы много большие, чем угол естественного расхождения фотонного пучка  $1/\gamma$  (где  $\gamma$  – релятивистский фактор). Фотоны, генерируемые такими вставными устройствами, имеют широкий спектр и дают возможность засвечивать большую геометрическую область образца. Однако в этом случае необходимо выделять из широкого непрерывного спектра излучения большой мощности тот спектральный диапазон, который требуется для эксперимента при использовании средств рентгеновской оптики, а значительную часть неиспользуемой мощности приходится поглощать оптическими элементами канала вывода излучения.

### 2.1. Сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм и полем 2.7 Тл для станций 1–3

При разработке экспериментальной станции 1–3 “Быстропротекающие процессы”, предназначенной для получения “рентгеновского кино” при исследовании материалов в условиях импульсных ударных нагрузок с характерными масштабами времени от пикосекунд до миллисекунд, требовалось устройство, обеспечивающее генерацию максимального количества фотонов на один электронный ступок в широком спектраль-

ном диапазоне от 20 кэВ до 70 кэВ. В этом случае было оправдано использование именно вигглера, поскольку создание ондулятора, генерирующего излучение на высоких гармониках с энергией квантов до 70 кэВ, в настоящее время технически недоступно. В качестве вставного устройства, оптимального для заданной энергии и имеющего широкий пучок для решения задач радиографии, был разработан сверхпроводящий 148-полюсный вигглер с периодом 27 мм и магнитным полем 2.7 Тл. Полная мощность излучения, генерируемого в горизонтальный угол  $\pm 1.2$  мрад, была ограничена величиной около 35 кВт для защиты элементов канала вывода излучения от высокой тепловой нагрузки. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из этого вигглера представлено на рис. 1а. Основная обмотка имеет одну секцию и изготавливается из сверхпроводящего провода Nb–Ti/Cu диаметром 0.9 мм, имеющего критический ток 570 А в поле 7 Тл. В настоящее время закончено изготовление полноразмерной 148-полюсной магнитной структуры вигглера и проведены предварительные испытания в жидком гелии. В процессе тренировки был достигнут рабочий уровень магнитного поля 2.7 Тл, как показано на рис. 2а. Внешний вид вигглера в процессе сборки представлен на рис. 3. Параметры этого устройства являются на сегодняшний день рекордными с точки зрения достижения максимально возможного уровня поля при минимальной величине периода. Ближайшим по этим параметрам является 119-полюсный сверхпроводящий вигглер с полем 2.1 Тл и периодом 30 мм, установленный на накопителе

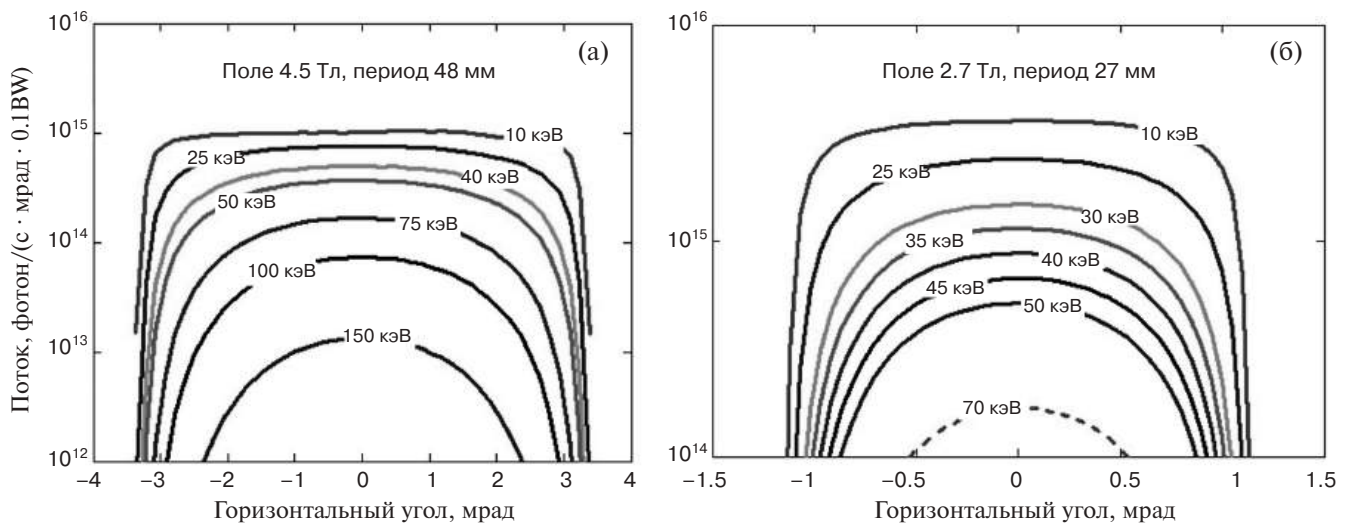


Рис. 1. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из вигглеров с полем 2.7 Тл (а) и 4.5 Тл (б) для тока 0.4 А и энергии пучка 4 ГэВ.

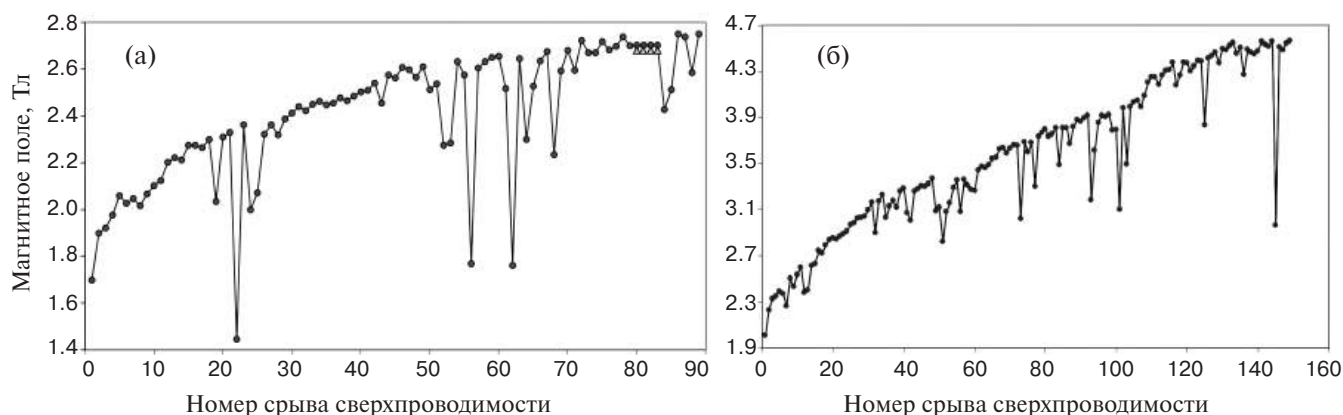


Рис. 2. Графики тренировки сверхпроводящих вигглеров для получения максимального уровня поля 2.7 Тл (а) и 4.5 Тл (б).



Рис. 3. Внешний вид вигглера с периодом 27 мм и полем 2.7 Тл в процессе сборки.

ALBA [4]. В 2023 году планировалось провести запуск вигглера в собственном криостате с проведением полного цикла испытаний.

### 2.2. Сверхпроводящий вигглер с периодом 48 мм и полем 4.5 Тл для станции 1–5

Экспериментальная станция 1–5, называемая “Диагностика в высокоэнергетичном рентгеновском диапазоне”, предназначена для исследования образцов в области материаловедения, геологии, археологии и биомедицины методами рентгеноструктурного и рентгенофлуоресцент-

ного анализа в жестком диапазоне фотонов. Основные параметры магнитной структуры вигглера были оптимизированы для получения максимально возможного потока фотонов в требуемом диапазоне энергий от 25 до 150 кэВ. Поскольку основной вклад в тепловую нагрузку на элементы рентгеновской оптики дает поглощение мягкой части спектра, а жесткость спектра пропорциональна величине магнитного поля, то спектр излучения был сдвинут в жесткую область за счет получения максимально возможного уровня магнитного поля. При минимальном технологически возможном магнитном

зазоре величиной 7 мм, который ограничен условиями динамики электронного пучка по вертикальной апертуре вакуумной камеры 5 мм, оптимальный уровень магнитного поля составил 4.5 Тл при периоде 48 мм, а число основных периодов равно 18. Для изготовления обмоток был использован сверхпроводящий провод Nb–Ti/Cu диаметром 0.9 мм, имеющий критический ток около 380 А в поле 7 Тл. Дополнительным условием было ограничение мощности излучения на уровне примерно 35 кВт во избежание теплового разрушения алмазных окон канала вывода излучения. При этом полная мощность излучения генерируется в горизонтальный угол  $\pm 3.5$  мрад. На рис. 16 представлено спектрально-угловое распределение потока фотонов для данного вигглера. Полноразмерная 40-полюсная магнитная система вигглера была успешно испытана в криостате с жидким гелием, где в процессе тренировки было достигнуто требуемое рабочее поле величиной 4.5 Тл, как представлено на рис. 26. Запуск вигглера и проведение полного цикла испытаний в собственном криостате планировалось провести в 2023 году.

### 3. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ОНДУЛЯТОРЫ

Отличие магнитной структуры ондулятора от вигглера состоит в том, что в ондуляторе траектория электронного пучка отклоняется на малые углы, сравнимые с углом естественного расхождения пучка фотонов  $1/\gamma$ , в результате чего возникает интерференция излучения из всех полюсов, что приводит к дискретному спектру ондуляторного излучения в виде гармоник. Создание источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ со сверхмалым горизонтальным эмиттансом (около  $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$ ), который приближается к дифракционному пределу в наиболее востребованном диапазоне энергий фотонов, дает возможность создания когерентных пучков фотонов высокой яркости с энергией в десятки кэВ. Такие пучки могут генерироваться с помощью многополюсных сверхпроводящих ондуляторов с коротким периодом около 15–18 мм и магнитным полем на орбите около 1.2–1.6 Тл. Критерием качества ондулятора является величина среднеквадратичной фазовой ошибки, которая характери-

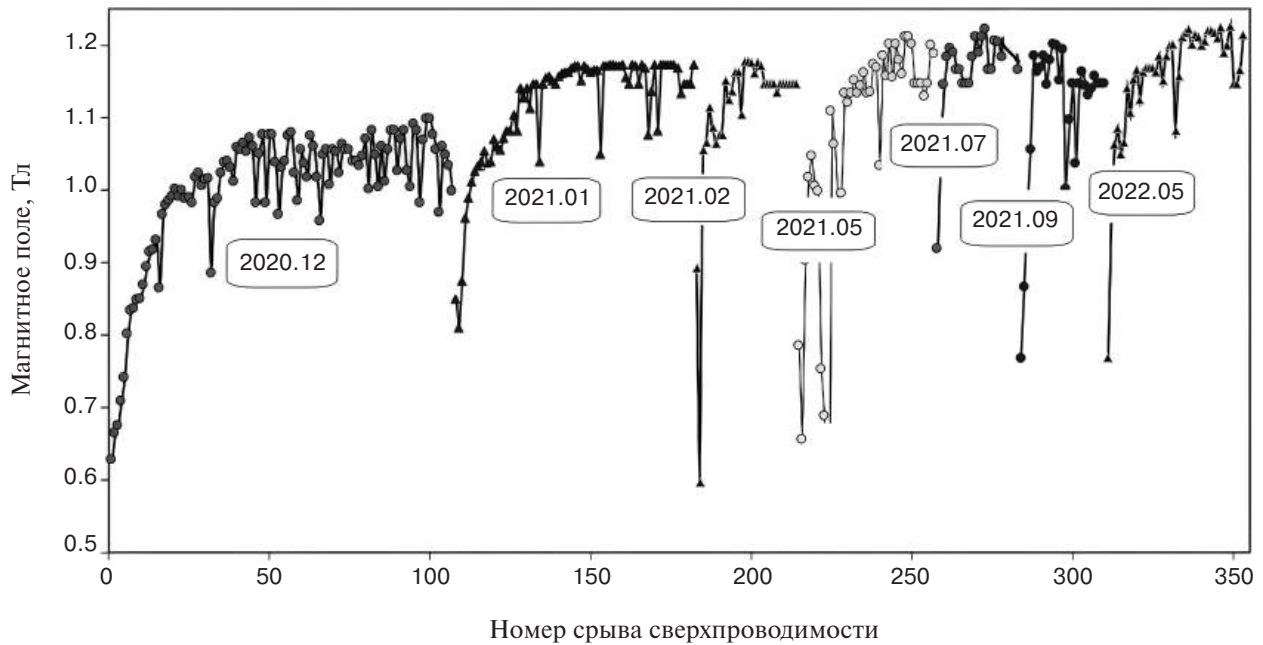
зует отличие магнитного поля реального ондулятора от идеального синусоидального поля и не должна превышать величину примерно три градуса. На современных накопителях с малым эмиттансом и разбросом по энергии значение этого параметра особенно возрастает, так как большая величина фазовой ошибки будет ограничивать яркость излучения на высоких гармониках и не позволит в полной мере использовать возможности накопителя.

#### *3.1. Сверхпроводящие ондуляторы с периодом 15.6 мм и полем 1.25 Тл для станций 1–1 и 1–2*

Для генерации излучения на экспериментальных станциях “Микрофокус” (1–1) и “Структурная диагностика” (1–2), предназначенных для исследований широкого спектра задач методами микроскопии и рентгеновской дифракции, будут использоваться два одинаковых сверхпроводящих ондулятора с периодом 15.6 мм и полем 1.25 Тл. Для проведения экспериментов необходимы высокие гармоники ондуляторного излучения с энергией фотонов вплоть до 35 кэВ. Это налагает особо жесткие требования на минимизацию величины фазовой ошибки, которая возрастает с увеличением разницы в амплитудах поля между полюсами, а также с нестабильностью величины периода на длине ондулятора. Разброс геометрических размеров магнитных полюсов по оценкам не должен превышать 10–20 мкм.

Для исследования технической возможности создания устройства с требуемыми характеристиками был спроектирован и изготовлен полноразмерный прототип 119-полюсного ондулятора, основанный на чередующихся активных и нейтральных полюсах [5]. Основным элементом магнитной структуры является сверхпроводящая катушка, намотанная на железном сердечнике. Использовался сверхпроводящий провод Nb–Ti/Cu диаметром 0.55 мм с критическим током 260 А в поле 7 Тл. Максимальное поле в критической области обмотки при токе 500 А составляет 4.25 Тл, что соответствует уровню поля 1.2 Тл на оси ондулятора. График тренировки магнитной системы сверхпроводящего ондулятора для получения максимального магнитного поля приведен на рис. 4.

Возможная нестабильность длины периода была минимизирована фрезеровкой пазов для установки сверхпроводящих полюсов с точно-

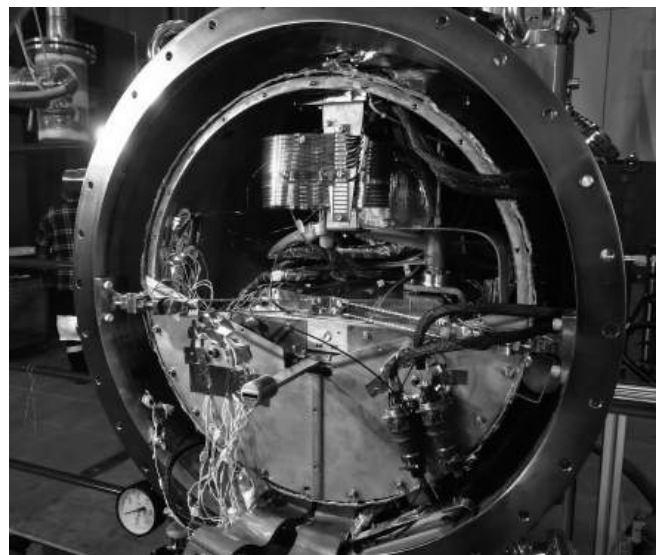


**Рис. 4.** График тренеровки магнитной системы сверхпроводящего ондулятора полем 1.2 Тл для получения максимального магнитного поля.

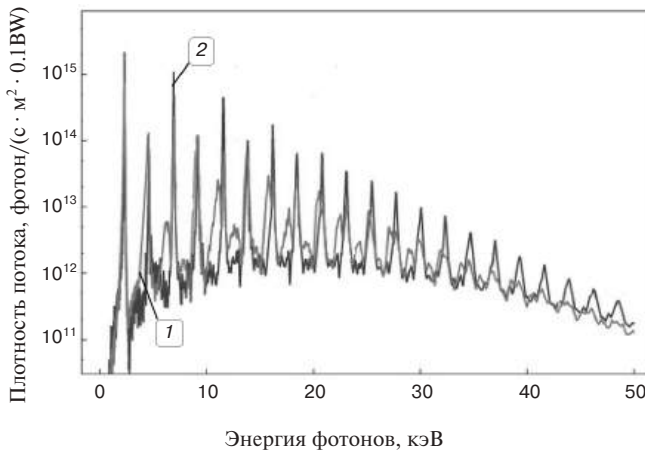
стью не хуже 10–20 мкм. Однако отладить технологию изготовления самих полюсов, обеспечивающую такую же повторяемость в размерах, не представляется возможным. Поэтому величина фазовой ошибки ондулятора, вычисленная на основе магнитных измерений сразу после изготовления ондулятора, оказалась более пяти градусов. Была проведена серия перестановок отдельных полюсов между собой на основе измерения амплитуд магнитного поля. Однако сильное взаимное влияние полей соседних катушек друг на друга не позволило определить вклад каждой отдельной катушки в результирующее магнитное поле. В результате величину фазовой ошибки удалось понизить только до четырех градусов. Для дальнейшего улучшения качества поля был предложен способ подавления фазовой ошибки, основанный на запитке отдельных групп полюсов независимыми корректирующими источниками тока на уровне примерно 1% от основного тока величиной около 500 А. Корректирующие токи вводились в обмотки ондулятора через специальные комбинированные токовводы, состоящие из последовательно соединенной медной проволоки, оптимизированной на протекание тока примерно до 5 А, ВТСП-ленты и Nb–Ti-проволоки. Места соединения всех участков, комбинированных токо-

вводов между собой, охлаждались через изолированные теплоперехваты соответствующими ступенями криокулеров с температурами 60К, 20 К и 4К. Внешний вид криостата с комбинированными ВТСП-токовводами для коррекции фазовой ошибки представлен на рис. 5.

Независимая запитка каждой группы катушек дала возможность подобрать корректирующие токи, позволившие одновременно скорректировать уровень магнитного поля и орбиту



**Рис. 5.** Внешний вид криостата в процессе сборки.

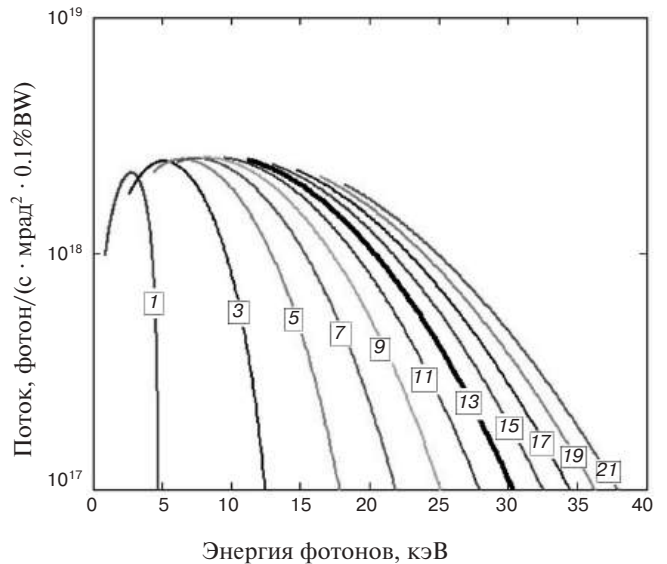


**Рис. 6.** Спектры излучения, рассчитанные программой SPECTRA на основе нескорректированного (1) и скорректированного (2) магнитных полей ондулятора.

пучка на всей длине ондулятора. В результате коррекции величина интегральной фазовой ошибки, вычисленной на основе измерений 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 [6] на основе нескорректированного и скорректированного магнитного поля ондулятора для энергии электронного пучка 3 ГэВ, тока 0.4 А и эмиттанса  $75 \text{ пм} \cdot \text{рад}$ , из которых видно, что спектральные пики излучения после коррекции магнитного поля значительно выросли на всех гармониках. Запуск ондуляторов в собственных криостатах был запланирован на 2024 г.

### 3.2. Сверхпроводящий ондулятор с периодом 18 мм и полем 1.6 Тл для станции 1–4.

Для экспериментальной станции 1–4 (“XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм”), использующей методы рентгеновской спектроскопии, оптимальным выбором источника излучения является сверхпроводящий ондулятор с периодом 18 мм и полем 1.6 Тл, который позволит проводить эксперименты в диапазоне от 4 кэВ до 35 кэВ. Конструкция этого устройства, основанная на тех же принципах, что и предыдущие ондуляторы, находится на стадии разработки и изготовления. Запуск ондулятора был запланирован на 2024 г. Спектральные характеристики данного вставного устройства представлены на рис. 7.



**Рис. 7.** Спектральный поток фотонов ондулятора с периодом 18 мм на гармониках с 1 по 21 при изменении поля от нуля до 1.6 Тл для тока 0.4 А и энергии пучка 4 ГэВ.

## 4. КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Криогенная система представленных вставных устройств основана на принципе косвенного охлаждения, когда магнит располагается в вакууме, а все притоки тепла в криостате перехватываются на соответствующие ступени криокулеров. Температура магнита на уровне около 3.5 К поддерживается за счет циркуляции жидкого гелия по каналам в теле магнита, а сам гелий содержится в отдельном сосуде, расположенном в защитном вакууме вне магнита. Предварительное охлаждение магнита до рабочих температур проводится посредством азотных тепловых трубок, обеспечивающих отвод тепла на 60К ступени криокулеров. При достижении температуры заморозания азота примерно 64 К тепловая связь между магнитом и криокулером автоматически разрывается. Дальнейшее охлаждение магнита происходит уже за счет циркуляции гелия. При этом для первичного охлаждения используется только газообразный гелий, который подается из баллона со сжатым гелием через редуктор. По мере понижения температуры плотность гелия в криостате увеличивается и по достижению соответствующей температуры начинается ожидение и набор рабочего уровня гелия в сосуде. После захолаживания криогенная система позволяет работать в таком режиме

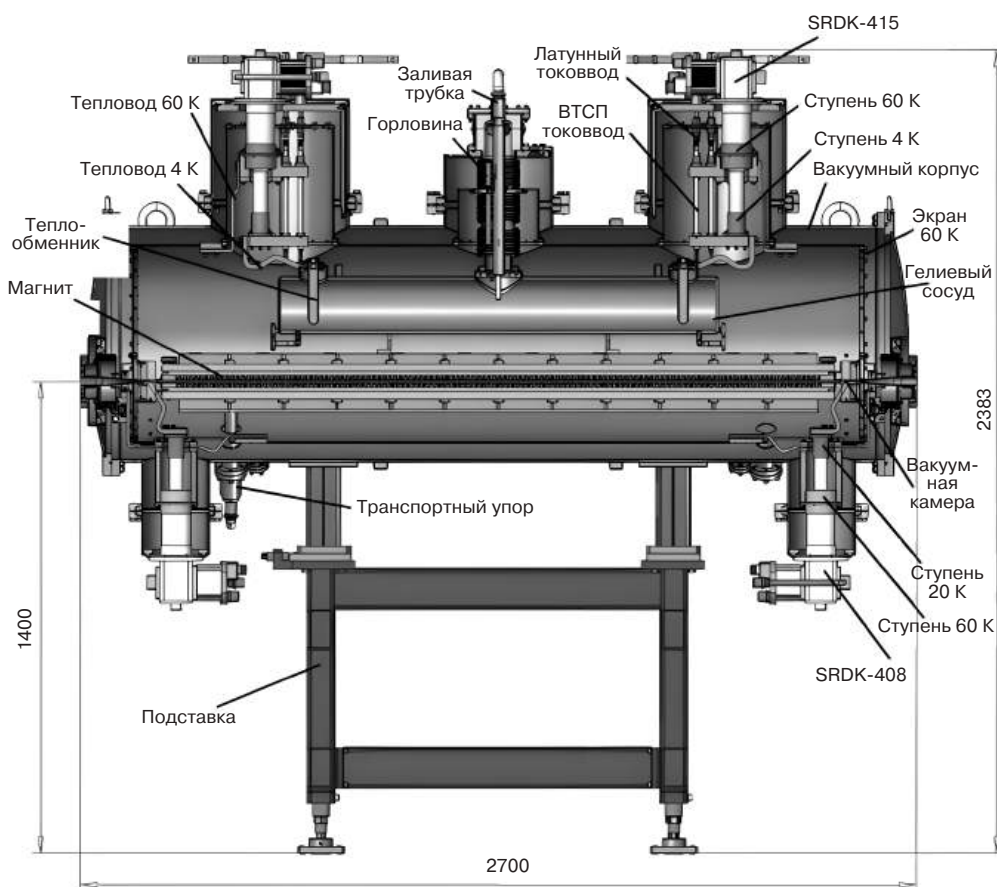


Рис. 8. Конструкция криостата на основе косвенного охлаждения для вигглеров и ондуляторов СКИФ.

автономно внутри биозащиты накопителя в течение нескольких лет. Конструкция криостата на основе косвенного охлаждения представлена на рис. 8.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными устройствами генерации синхротронного излучения на источнике СИ четвертого поколения СКИФ станут сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы, создаваемые в ИЯФ СО РАН, которые обеспечат требуемые спектральные характеристики для решения широкого спектра исследовательских задач.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levichev E. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2021. V. 24. P. 120704. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704>
2. Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А., Ерохин А.И., Зорин А.В., Лев В.Х., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н., Сыроватин В.М., Тарасенко О.А., Хрущев С.В., Цуканов В.М. // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 4(229). С. 567.
3. Bragin A., Khrushchev S., Lev V., Mezentssev N., Shkaruba V., Syrovatin V., Tarasenko O., Tsukanov V., Volkov A., Zorin A. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2018. V. 28. № 4. P. 4101904. <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2805162>.
4. Volkov A., Lev V., Mezentssev N., Miginskaya E., Syrovatin V., Khrushchev S., Tsukanov V., Shkaruba V. // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. V. 6. P. 379.
5. Шкаруба В.А., Брагин А.В., Волков А.А., Ерохин А.И., Зорин А.В., Казанцев Ф.П., Каноник П.В., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н., Седов А.А., Тарасенко О.А., Хрущев С.В., Цуканов В.М. // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 5. С. 627. <https://doi.org/10.31857/S0367676522701289>.
6. Tanaka T., Kitamura H. // Journal of Synchrotron Radiation. 200. V. 8. P. 1221. <https://doi.org/10.1107/S090904950101425X>.