

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.626:538.945

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ВИГГЛЕР С ПОЛЕМ 2.7 ТЛ И ПЕРИОДОМ
27 ММ ДЛЯ СТАНЦИИ “БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ”
НА ИСТОЧНИКЕ СКИФ¹

©2024 г. А. А. Седов^{a,*}, А. В. Брагин^a, А. А. Волков^{a,b}, А. И. Ерохин^a,
А. В. Зорин^a, Ф. П. Казанцев^a, П. В. Каноник^a, Н. А. Мезенцев^{a,b},
А. Н. Сафронов^a, О. А. Тарасенко^a, С. В. Хрущев^{a,b},
В. М. Цуканов^{a,b}, В. А. Шкаруба^{a,b}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 11

^b 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: A.A.Sedov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 18.01.2024 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 06.05.2024 г.

Для станции 1–3 “Быстропротекающие процессы” строящегося источника синхротронного излучения СКИФ необходимо вставное устройство, генерирующее фотоны с энергией вплоть до 70 кэВ и имеющее максимальный поток излучения с энергией 35 кэВ. Сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм, полем 2.7 Тл при межполюсном зазоре 7 мм удовлетворяет данным требованиям. Представлены основные характеристики и особенности конструкции магнитной и криогенной систем этого вставного устройства. Описаны теоретические расчеты параметров магнитной системы, а также параметры излучения из вставного устройства. Проведены оценки влияния вигглера на динамику пучка электронов в накопительном кольце. Представлены результаты измерений магнитного поля прототипа вигглера.

~~Ключевые слова: вигглер, сверхпроводящий магнит, криостат, синхротронное излучение~~

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент в наукограде Кольцово ведется строительство нового центра коллективного пользования (ЦКП) Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ). Планируется, что СКИФ будет работать на энергии 3 ГэВ и с горизонтальным натуральным эмиттансом 75 пм·рад, генерируя синхротронное излучение с предельной яркостью в диапазоне от 100 эВ до 100 кэВ для 30 различных экспериментальных станций [1]. Основными устройствами генерации фотонов будут сверхпроводящие многополюсные вставные устройства со знакопеременным магнитным полем – вигглеры и ондуляторы. Из 30 планируемых станций в первой очереди строительства источника предполагается ввести в эксплуатацию 6 станций, среди которых станция 1–3 “Быстропротекающие процессы”. На данной станции предполагается реализовывать методики малоуглового рентгеновского рассеяния, абсорбционного и фазового контраста, поэтому в качестве источника синхротронного излучения (СИ) будет использоваться сверхпроводящий вигглер, параметры которого были оптимизированы для получения максимального потока фотонов с энергией 35 кэВ [2].

Сверхпроводящий вигглер представляет собой многополюсный электромагнит со знакопеременным магнитным полем, состоящий из двух половинок, размещенных выше и ниже вакуумной камеры электронного пучка. Магнит помещен в специальный криостат с косвенным охлаждением на основе криокулеров, работающих без испарения жидкого гелия. Общий вид сверхпроводящего вигглера представлен на рис. 1. Основные параметры описываемого вигглера представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры сверхпроводящего вигглера для станции 1–3

Параметры	Значения
Номинальное магнитное поле, Тл	2.7
Период вигглера, мм	27
Межполюсный зазор, мм	7
Вертикальная апертура для пучка, мм	5
Горизонтальная апертура для пучка, мм	56
Число основных полюсов	144
Число полюсов $\frac{3}{4}$	2
Число полюсов $\frac{1}{4}$	2
Критическая энергия, кэВ	16.2
Коэффициент ондуляторности	6.8
Магнитная длина, мм	~ 2000

Рис. 1. Общий вид магнитной системы сверхпроводящего вигглера с полем 2.7 Тл для станции 1–3.

2. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Основные параметры вигглера после оптимизации были следующие: магнитное поле 2.7 Тл, период 27 мм и количество основных полюсов 144. Конфигурация магнитной системы вигглера – горизонтальный рейстрек [3]. Параметры изготовленных магнитных полюсов приведены в табл.2.

Таблица 2. Параметры сверхпроводящих полюсов

Параметры катушек	Главный полюс	Полюс 3/4	Полюс 1/4
Число слоев	4	5	1
Количество витков в слое	14	14	14
Высота, мм	21	21	21
Длина сердечника, мм	6.6	6.6	6.6
Ширина сердечника, мм	65	65	65
Ток, А	772	406	366

Магнитная система вигглера была собрана из сверхпроводящих катушек и корпуса, который был изготовлен из алюминиевого сплава 6063 с высокой теплопроводностью при низких температурах. Корпус, во-первых, выполнял функцию механической рамы, поддерживающей все катушки магнита, и, во-вторых, обеспечивал отвод тепла от катушек для их охлаждения. Данный корпус был собран из двух половинок, расположенных выше и ниже оси вигглера и специальных проставок, обеспечивающих необходимый зазор. Удаленные от срединной плоскости части сердечников катушек прижимались винтами к внутренней поверхности алюминиевого корпуса, что обеспечивало тепловой контакт и правильное геометрическое положение катушек в пространстве. Катушки на каждой половине магнита были сжаты между собой вдоль продольной координаты плитами из нержавеющей стали с помощью шпилек из бериллиевой бронзы для предотвращения перемещения витков обмотки под действием сил магнитного поля.

Катушка была изготовлена в виде горизонтального рейстрека. Такая форма позволяет обеспечить требуемую поперечную однородность поля. При выборе ширины магнитного керна учитывалось, что в зазоре будет размещена вакуумная камера с поперечными размерами не менее 60 мм. Материал керна – сталь АРМКО. В качестве обмотки был выбран сверхпроводящий провод Nb–Ti диаметром 0.9 мм с критическим током 520 А в поле 7 Тл при температуре 4.2 К. Расчетное положение рабочей точки, характеризующей состояние сверхпроводящего провода в обмотках катушек с данными параметрами, относительно

нагрузочной кривой сверхпроводящего провода представлено на рис. 2.

Рис. 2. Расположение рабочей точки, характеризующей состояние сверхпроводящего провода в обмотках, относительно критической кривой сверхпроводящего провода.

Магнитное поле вигглера при установке его на действующий накопитель не должно влиять на орбиту электронов вне вставного устройства, поэтому для замыкания орбиты на концах магнитной системы вигглера были установлены корректирующие полюса. В данной магнитной структуре была выбрана схема с боковыми полюсами $3/4$ и $1/4$, которые запитываются двумя независимыми токами. Для упрощения изготовления боковых катушек они имеют такие же железные сердечники, как у основного полюса, и одинаковое число витков в слое.

Все катушки магнитов соединены последовательно с использованием технологии холодной сварки, которая снижает сопротивление соединений более чем в 1000 раз по сравнению с обычной пайкой. Это позволяет радикально снизить джоулев нагрев контактов между катушками, учитывая, что на полноразмерном магните имеется более 300 межполюсных соединений.

На верхней части магнита была расположена пассивная часть системы защиты катушек, представляющая собой набор резисторов и диодов, соединенных параллельно с группами катушек для ограничения максимального напряжения, возникающего на них во время срыва (рис. 3). Активная часть системы защиты представляла собой специальный детектор срыва сверхпроводимости, отключающий источники питания при появлении напряжения на защитных резисторах.

Рис. 3. Схема подключения обмоток и система защиты вигглера.

3. КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА

Криогенная система вигглера основана на принципе косвенного охлаждения с помощью криокулеров [4] (рис. 4).

Рис. 4. Схема криостата с косвенным охлаждением [4].

Криостат был собран из внешнего корпуса, экранов с температурами 60 К и 20 К для уменьшения внешнего теплового потока, сосуда с жидким гелием, теплопроводов, специальных токоподводов и четырех криоохладителей, два из которых SUMITOMO SRDK-415D и два SUMITOMO SRDK-408S2.

Внешний корпус криостата был изготовлен из нержавеющей стали в форме цилиндра диаметром 70 см. С каждого конца на цилиндр были установлены торцевые фланцы. Все стыки были уплотнены с помощью специальных резиновых прокладок.

Сосуд с жидким гелием был изготовлен в форме цилиндра с объемом около 40 л и толщиной стенок 3 мм. Гелиевый бак был установлен на корпусе вигглера и соединен с двумя продольными отверстиями круглой формы, просверленными как в верхней, так и в нижней половине корпуса магнитной системы вигглера.

Магнит был окружен двумя медными экранами с температурами 20 К и 60 К, которые охлаждались соответствующими ступенями криокулеров. Для дополнительной задержки потоков теплового излучения извне медные экраны были покрыты несколькими слоями криогенной суперизоляции.

Магнитная система вместе с гелиевым сосудом были подвешены с помощью кевларовых ремней, закрепленных на корпусе криостата. Внутри корпуса поддерживался вакуум на уровне порядка 10^{-6} – 10^{-8} мбар для снижения теплового потока, передающегося через молекулы остаточного газа.

Для охлаждения всех элементов криостата была использована система медных теплопроводов, которые перехватывают потоки тепла и отводят его на головки четырёх криокулеров: двух SRDK-415D с температурами 4 К и 60 К и двух SRDK-408S2 с температурами 20 К и 60 К [5].

4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИГГЛЕРА НА ПАРАМЕТРЫ И ДИНАМИКУ ПУЧКА

В данной работе были проведены аналитические оценки влияния сверхпроводящего вигглера на пучок. Расчеты фокусирующих свойств магнитного поля были сделаны в приближении бесконечных плоскопараллельных по горизонтали полюсов. Данное приближение оправдано высокой однородностью поля данного вигглера:

$$\Delta v = \frac{KL\beta}{4\pi} \left(1 + \frac{L^2}{12\beta^2} \right), \quad \frac{\Delta\beta}{\beta} = -\frac{KL\beta}{2\sin\mu} \left(1 - \frac{L^2}{12\beta^2} \right). \quad (1)$$

Параметры оптических функций базовой структуры с прямолинейным промежутком, которые были использованы при расчетах, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры оптических функций

Величины	Значения
β_x в центре промежутка, м	15.4
β_y в центре промежутка, м	2.4
Дисперсия в пустом промежутке, м	0

Используя формулы (1) в соответствии с данным приближением, мы рассчитали сдвиг бетатронных частот и величину бетатронных биений. При рабочем поле 2.7 Тл

$$\Delta v_y \approx 24 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{\Delta \beta_y}{\beta_y} \approx 63 \cdot 10^{-3}.$$

Для оценки влияния вигглера на радиационные свойства электронного пучка был использован формализм структурных интегралов [6]. Результаты расчетов изменения интегралов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Параметры сверхпроводящих полюсов

Параметры	Параметры структуры без вигглера	Параметры структуры после включения вигглера
Энергетический разброс	$1 \cdot 10^{-3}$	$0.97 \cdot 10^{-3}$
Эмиттанс, пм	73.2	66.76
Потери за оборот, кэВ	536	619
Коэффициент уплотнения орбит	$7.64 \cdot 10^{-5}$	$7.6397 \cdot 10^{-5}$
Радиационные числа, x/s	1.94/1.06	1.81/1.19
Время затухания, t_x/t_s	9.2/16.7	8.5/12.9

Из полученных результатов следует, что вигглер оказывает заметное влияние на оптику пучка электронов. Для компенсации рассмотренных выше явлений необходима корректирующая магнитная структура, поэтому на концах прямолинейного промежутка будут установлены квадрупольные линзы с независимыми источниками питания [7].

5. СВОЙСТВА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ВСТАВНОГО УСТРОЙСТВА

Расчеты параметров излучения были проведены с помощью программ Mathcad и SPECTRA [8]. Из расчетов было установлено, что суммарная мощность синхротронного излучения составляет примерно 29.8 кВт, а критическая энергия излучения 16.2 кэВ. Результат расчета углового спектрального распределения потока фотонов от вигглера показан на рис. 5. Спектр вигглера для станции станции 1–3 СКИФ в сравнении со станцией 8 ВЭПП-4 представлен на рис. 6. Все расчеты проводились для рабочего поля $B = 2.7$ Тл, энергии электронного пучка $E = 3$ ГэВ и тока пучка $I = 400$ А.

Рис. 5. Спектрально-угловое распределение потока фотонов из вигглера.

Рис. 6. Спектральная плотность потока на оси.

6. ИСПЫТАНИЯ ПРОТОТИПА ВИГГЛЕРА И ПОЛНОРАЗМЕРНОГО МАГНИТА

Оба испытания были проведены в погружном криостате при гелиевых температурах с помощью поперечной линейки из 5 датчиков Холла. В первом испытании проводились

измерения короткого прототипа, который был изготовлен для проверки правильности расчетов. Данный прототип был собран из железного корпуса и 20 основных сверхпроводящих полюсов. Фиксация витков обмотки от перемещений под действием сил магнитного поля осуществлялась при помощи специальной бандажирующей системы, которая включает в себя железные плиты и шпильки из бериллиевой бронзы. Для дистанцирования верхних и нижних полюсов при включении поля между двумя половинами были установлены вставки из немагнитного материала. Внешний вид прототипа в процессе сборки представлен на рис. 7.

Рис. 7. Внешний вид прототипа: **а** – собранный прототип вигглера, **б** – нижняя половина с пластиковыми вставками.

В процессе тренировок полюсов было 22 перехода сверхпроводящего провода в нормальное состояние, а максимальное магнитное поле, которого удалось достичь, 3.24 Тл. Процесс тренировки прототипа представлен на рис. 8.

Рис. 8. История тренировки прототипа.

Успешное испытание прототипа позволило принять решение об изготовлении полного вигглера, состоящего из 144 основных и 4 дополнительных полюсов. Испытания сверхпроводящего вигглера проводились двое суток. На рис. 9 приведена история тренировки сверхпроводящих катушек. Максимальное поле при испытаниях составило порядка 2.7 Тл.

Рис. 9. История тренировки сверхпроводящего вигглера.

Подбор токов для приравнивания к нулю первого и второго интегралов поля проводился для поля 2.64 Тл при суммарном токе 760 А. Варьируя величины токов питания, мы получили минимальное значение первого интеграла поля $I_1 = 5 \cdot 10^{-6}$ Тл · м, которое удовлетворяет заданным требованиям.

В дальнейшем планируется второе испытание вигглера в погружном криостате для полной тренировки полюсов, а также сборка и испытание прототипа в собственном криостате для определения токов коррекции в краевых полюсах при подъеме поля.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы был собран и успешно испытан 144-полюсный сверхпроводящий вигглер с периодом 27 мм и уровнем магнитного поля 2.7 Тл для станции 1–3 “Быстропротекающие процессы”. Результаты измерений достаточно хорошо совпадают с модельным распределением поля вигглера.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Левичев Е.Б., Журавлев А.Н., Золотарев К.В., Зубавичус Я.В., Шефер К.И.* Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов “СКИФ”. Электронный сборник статей. Новосибирск. 2022. Т. 1. С. 4.
2. *Рубцов И.А., Прууэл Э.Р., Тен К.А. и др.* Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов “СКИФ”. Электронный сборник статей. Новосибирск. 2022. Т. 1. С. 116.
3. *Волков А.А., Брагин А.В., Ерохин А.И. и др.* Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов “СКИФ”. Электронный сборник статей. Новосибирск. 2022. Т. 3. С. 6.
4. *Хрущев С.В., Цуканов В.М., Шкаруба В.А., Мезенцев Н.А., Сафронов А.Н.* // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87. № 5. С. 656.
5. *Tsukanov V.M., Khrushchev S.V., Mezentssev N.A., Safronov A.N., Shkaruba V.A.* // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2299. P. 020018. <http://doi.org/10.1063/5.0030402>
6. *Helm R.H., Lee M.J., Morton P.L. Sands M.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1973. V. 20. № 3. P. 900. <https://doi.org/10.1109/TNS.1973.4327284>
7. *Акимов А.В., Актершев Ю.С., Анашин В.В. и др.* Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов “СКИФ”. Электронный сборник статей. Новосибирск. 2022. Т. 2. С. 98.
8. *Tanaka T., Kitamura H.* // J. Synchrotron Radiat. 2001. V. 8. № 6. P. 1221.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Общий вид магнитной системы сверхпроводящего вигглера с полем 2.7 Тл для станции 1–3.
- Рис. 2.** Расположение рабочей точки, характеризующей состояние сверхпроводящего провода в обмотках, относительно критической кривой сверхпроводящего провода.
- Рис. 3.** Схема подключения обмоток и система защиты вигглера.
- Рис. 4.** Схема криостата с косвенным охлаждением [4].
- Рис. 5.** Спектрально-угловое распределение потока фотонов из вигглера.
- Рис. 6.** Спектральная плотность потока на оси.
- Рис. 7.** Внешний вид прототипа: **а** – собранный прототип вигглера, **б** – нижняя половина с пластиковыми проставками.
- Рис. 8.** История тренировки прототипа.
- Рис. 9.** История тренировки сверхпроводящего вигглера.

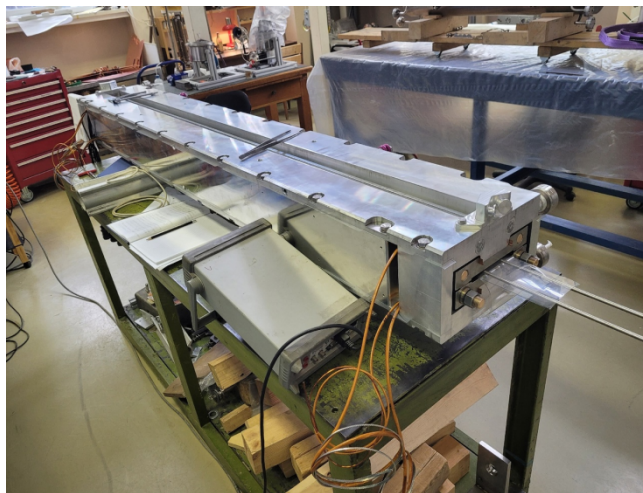


Рис. 1

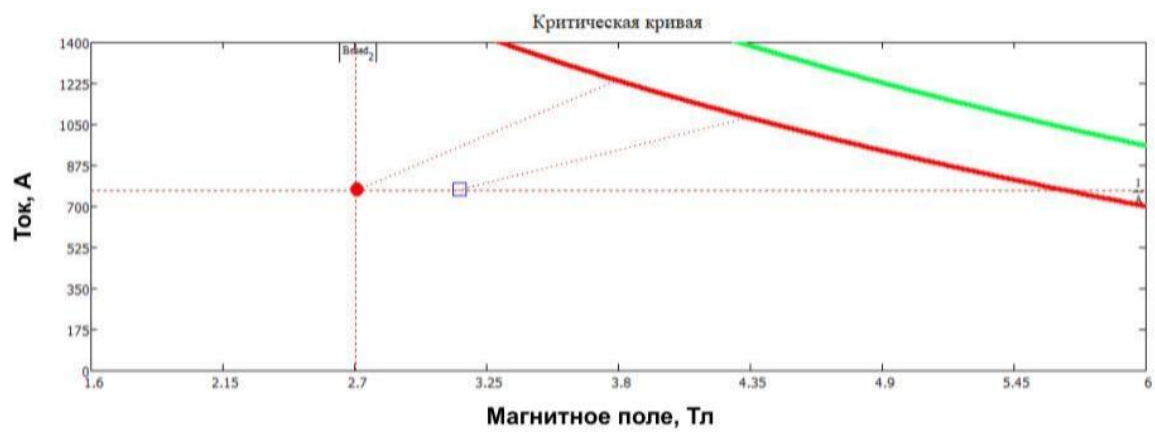


Рис. 2

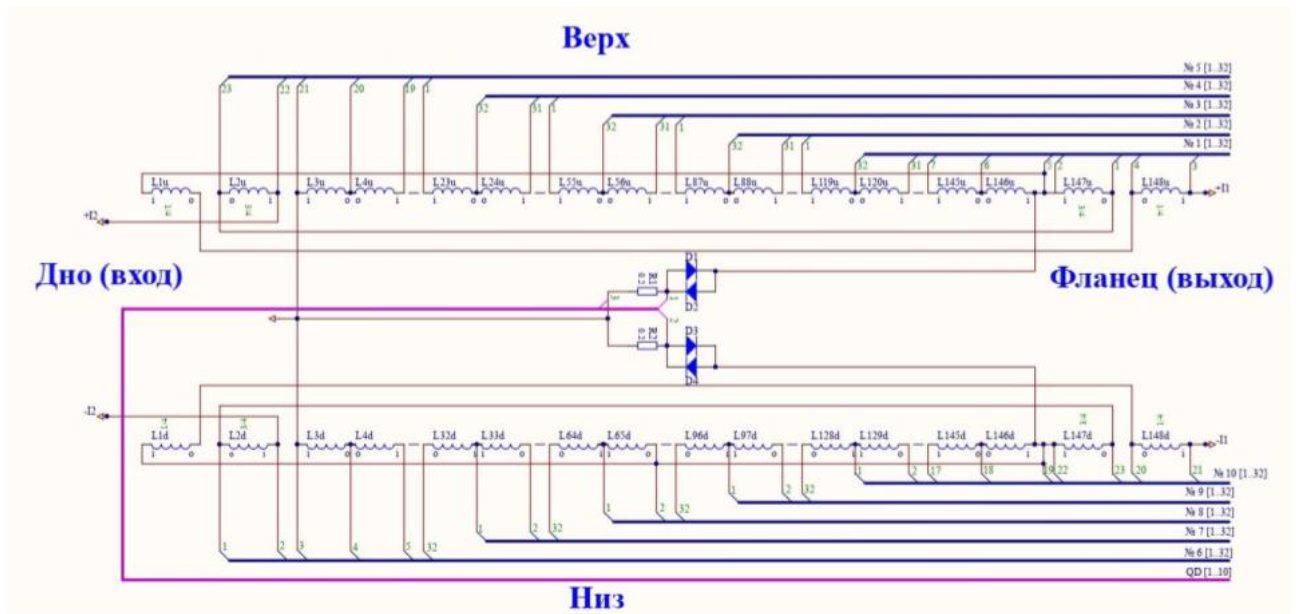


Рис. 3

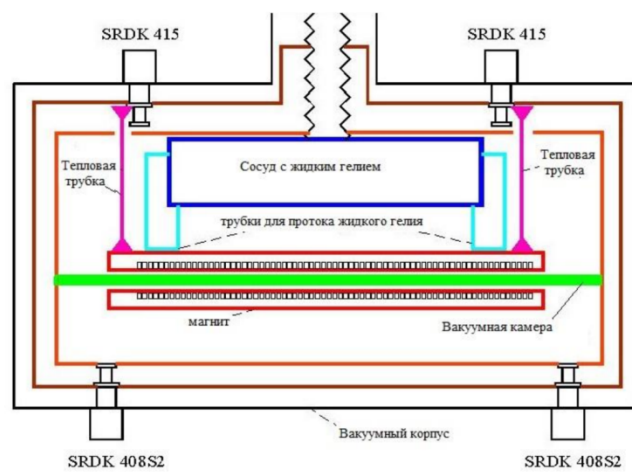


Рис. 4

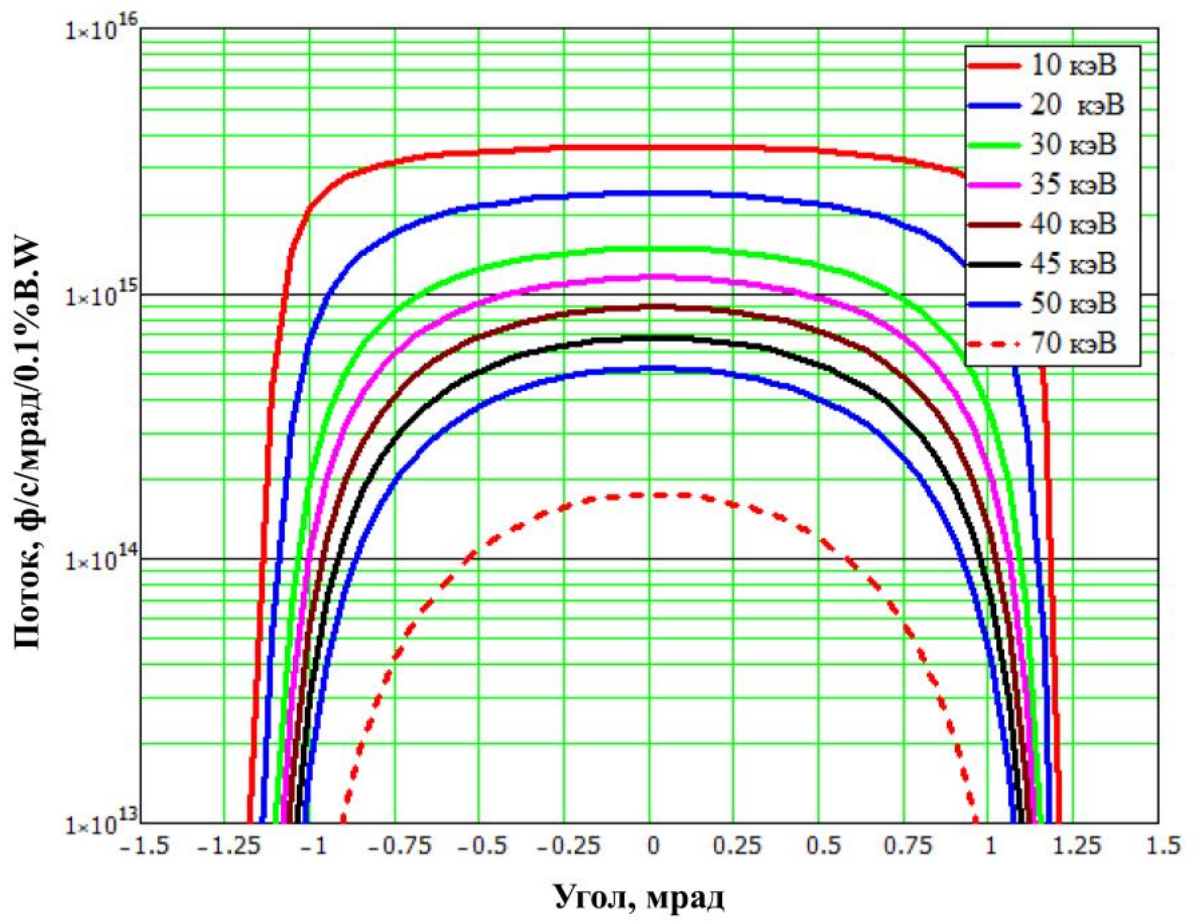


Рис. 5

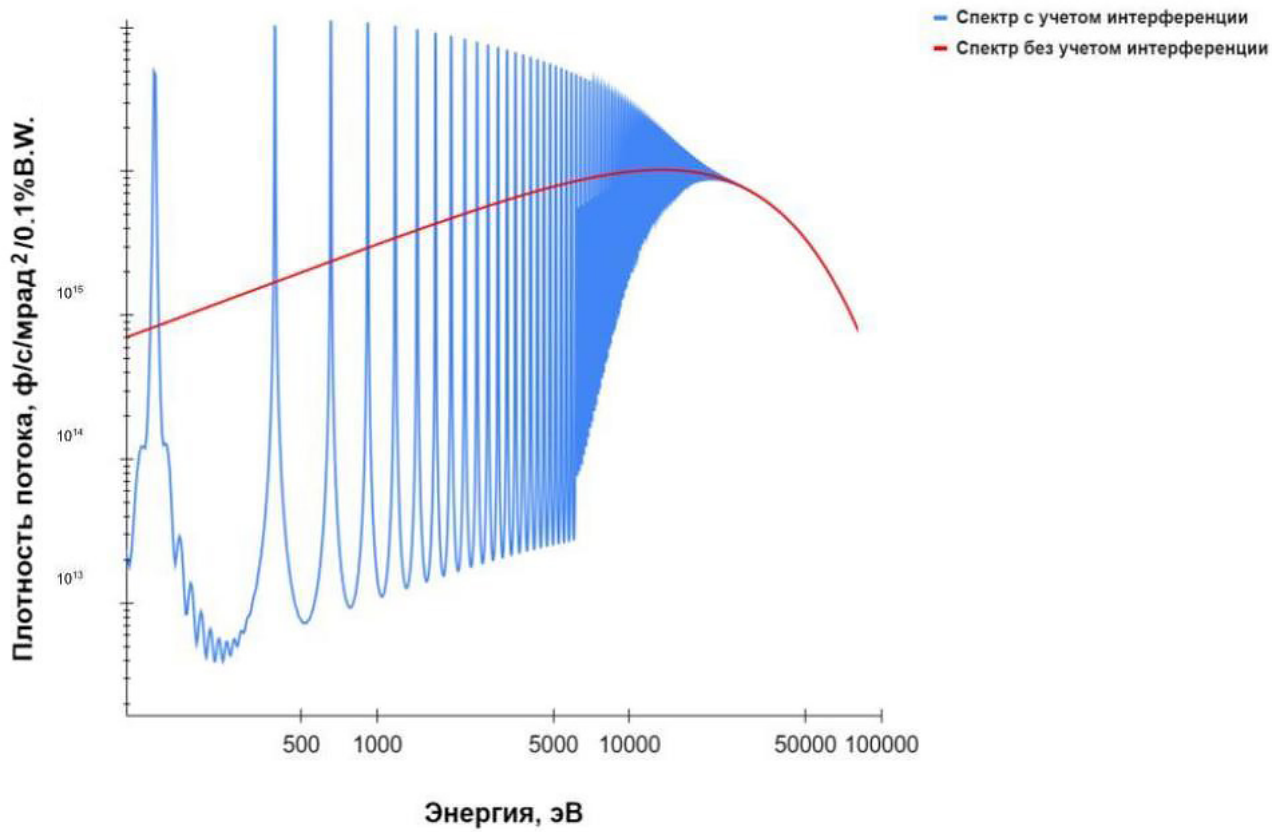
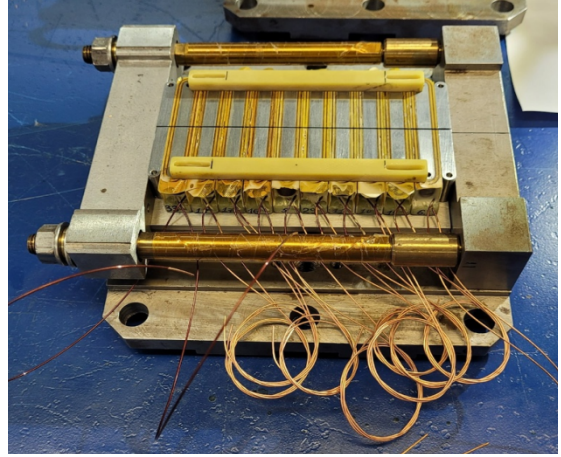


Рис. 6



а



б

Рис. 7

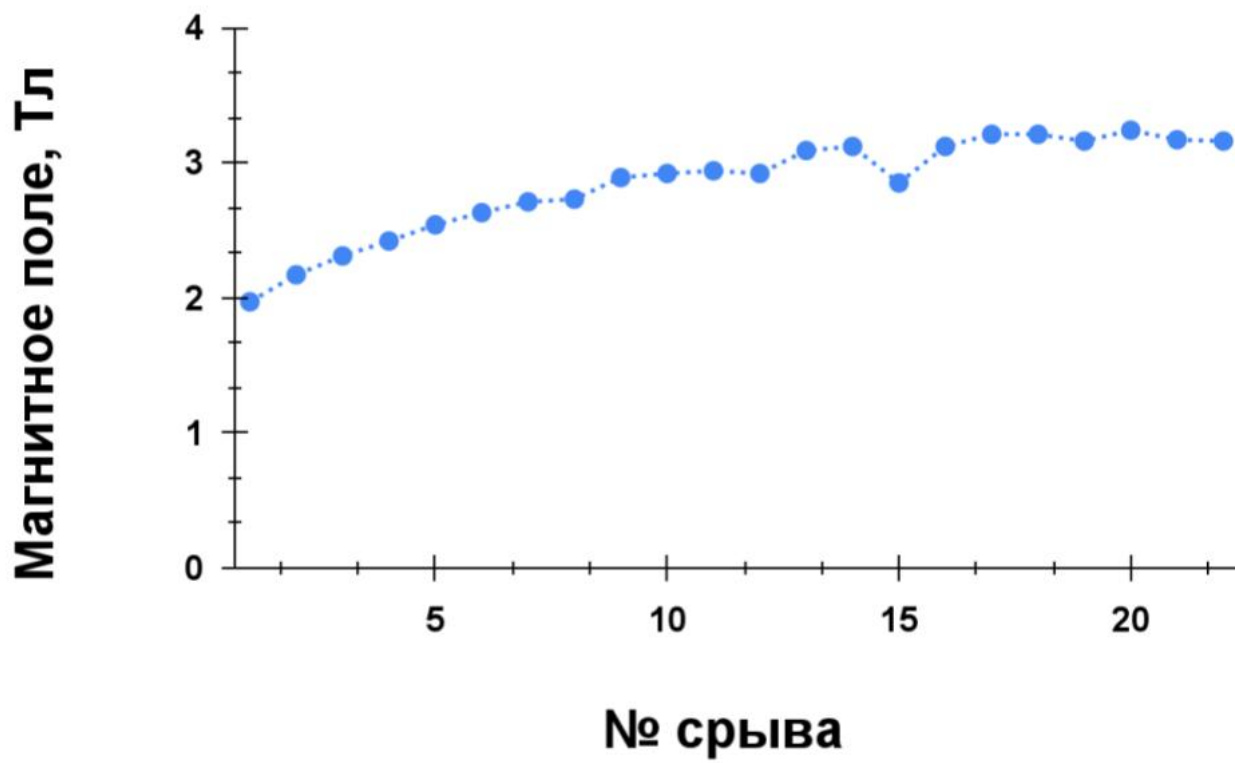


Рис. 8

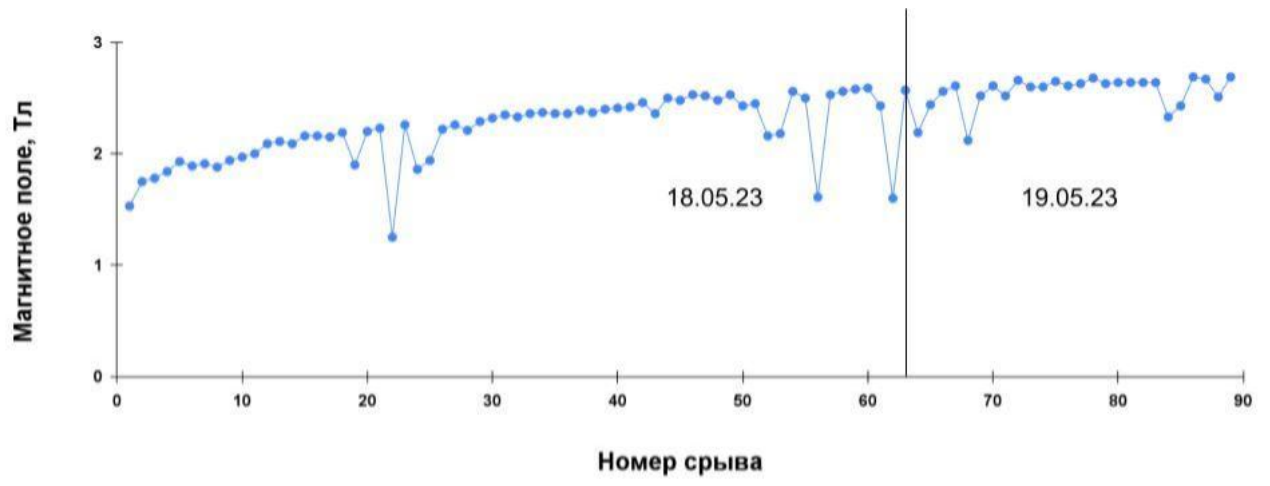


Рис. 9

Для связи с авторами:

Седов Андрей Алексеевич
E-mail: A.A.Sedov@inp.nsk.su
Тел.: 8-963-502-68-62 (моб.)

Шкаруба Виталий
shkaruba@inp.nsk.su
Брагин Алексей
a.v.bragin@inp.nsk.su
Волков Аскольд
a.a.volkov@inp.nsk.su

Для переводчика:

SUPERCONDUCTING WIGGLER WITH A FIELD OF 2.7 T AND A PERIOD OF 27 MM FOR THE “FAST PROCESSES” STATION AT THE SKIF SOURCE

©2024 A. A. Sedov¹ #, A. V. Bragin¹, A. A. Volkov^{1,2}, A. I. Erokhin¹,
A. V. Zorin¹, F. P. Kazantsev¹, P. V. Kanonik¹, N. A. Mezentsev^{1,2},
A. N. Safronov¹, O. A. Tarasenko¹, S. V. Khrushchev^{1,2},
V. M. Tsukanov^{1,2}, V. A. Shkarub^{1,2}

¹ *Budker Institute of Nuclear Physics of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 630090, Novosibirsk.*

² *Synchrotron radiation facility - Siberian Circular Photon Source “SKIF”
Boreskov Institute of Catalysis of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 630559, Novosibirsk region, Koltsovo.*

#e-mail: A.A.Sedov@inp.nsk.su

Abstract - For station 1-3 “Fast processes” of the SKIF synchrotron radiation source under construction, an insertion device is required that generates photons with energies up to 70 keV and has a maximum radiation flux at an energy of 35 keV. A superconducting wiggler with a period of 27 mm, a field of 2.7 T and gap of 7 mm satisfies these requirements. This article presents the main characteristics and design features of the magnetic and cryogenic systems of this insertion device. Theoretical calculations of the parameters of the magnetic system, as well as the parameters of radiation from the insertion device, are described. The influence of the wiggler on the dynamics of the electron beam in the storage ring has been assessed. The results of measurements of the magnetic field of the wiggler prototype are presented.

Key words: wiggler, superconducting magnet, cryostat, synchrotron radiation