

УДК 53.07:535-34

## ПРОЕКТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЭПП-4М

© 2019 г. Б. Г. Гольденберг<sup>1, \*</sup>, Я. В. Ракшун<sup>1, 2</sup>, С. В. Бугаев<sup>1</sup>,  
О. И. Мешков<sup>1, 3</sup>, С. В. Цыбуля<sup>3, 4</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова, Новосибирск, Россия

\*E-mail: goldenberg@inp.nsk.su

На канале №1 вывода синхротронного излучения (СИ) из накопителя ВЭПП-4М создается Технологическая станция СИ (далее ТССИ). Новая станция предназначена для практического изучения студентами ВУЗов основ синхротронных методов исследования. Модульная концепция построения станции позволяет менять аппаратуру и реализовать как различные исследовательские методы, так и проводить эксперименты по тестированию нового экспериментального оборудования на СИ и выполнять некоторые вспомогательные эксперименты. Представлены дизайн станции, характеристики излучения в сравнении с другими действующими станциями СИ и основные учебные программы.

DOI: 10.1134/S0367676519020157

### ВВЕДЕНИЕ

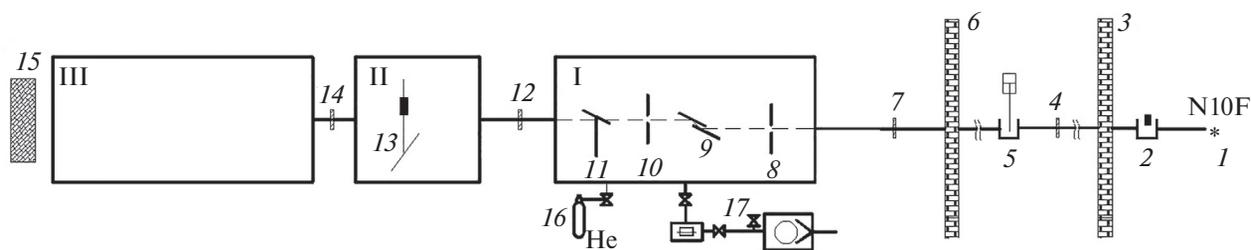
Синхротронное излучение (СИ) – давно признанный инструмент аналитических методик исследования состава и структуры вещества. Методики рентгеноспектрального анализа, дифракционных исследований и XAFS-спектроскопии успешно применяются в ведущих мировых исследовательских центрах, в том числе в Центре коллективного пользования “Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения” (ЦКП СЦСТИ). Перспективы развития ЦКП СЦСТИ и создания нового ЦКП “Сибирский кольцевой источник фотонов” (ЦКП “СКИФ”) обуславливают необходимость расширения программ подготовки специалистов для работы с синхротронным излучением на базе ИЯФ СО РАН при участии НГУ и НГТУ.

В настоящее время работы с синхротронным излучением выполняются на экспериментальных станциях накопителей ВЭПП-3 и ВЭПП-4М [1, 2]. Кроме этого на накопителях проводятся исследования по тематикам физики элементарных частиц (ФЭЧ) с детектором КЕДР. Совмещение режимов СИ и ФЭЧ на существующих станциях технически невозможно, и работы ведутся поочередно. Как следствие, выделение на экспериментальных станциях СИ времени для проведения учебных или отладочных работ очень ограничено. Это определяет актуальность создания специали-

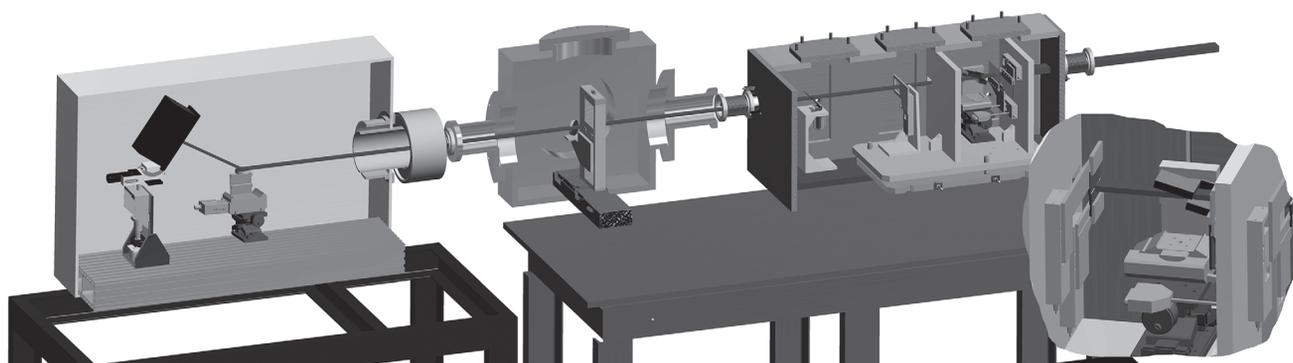
зированной станции, на которой можно будет в базовой конфигурации проводить работы по изучению основных методик исследований с применением СИ. Важной особенностью является использование в качестве источника СИ поворотного магнита N10F накопителя ВЭПП-4М. Данный магнит расположен первым в начале участка магнитов, используемых для генерации СИ на ВЭПП-4М. За этим магнитом установлена система электростатического разведения пучков, используемая при работе по ФЭЧ (на детекторе КЕДР) и делающая невозможным вывод СИ из накопителя на экспериментальные станции. На излучение магнита N10F система электростатического разведения не влияет, а, следовательно, в канале № 1 возможно проведение работ с СИ параллельно с экспериментами ФЭЧ, что значительно увеличивает экспериментальное время на создаваемой Технологической станции СИ.

### НАЗНАЧЕНИЕ СТАНЦИИ

Технологическая станция СИ (далее ТССИ) предназначена для обучения пользователей и студентов (физический факультет НГУ, факультет естественных наук НГУ, физико-технический факультет НГТУ и др.) работе с основными элементами аппаратуры СИ, основам методик проведения исследований на пучках СИ, включая технику безопасности при проведении экспери-



**Рис. 1.** Схема ТССИ: 1 – источник излучения (поворотный магнит N10F); 2 – штыревой приемник излучения; 3, 6 – стены биозащиты; 4, 7, 12, 14 – бериллиевые фольги; 5 – радиационный затвор; 8, 10 – блок щелей; 9 – монохроматор; 11 – люминофорный датчик; 13 – ХУ-сканер; 15 – поглотитель пучка, 16 – напуск гелия, 17 – форвакуумный пост.



**Рис. 2.** Компоновка Технологической станции СИ (в разрезе).

ментов, обслуживание экспериментального оборудования, подготовку образцов и проведение непосредственно экспериментов на пучках СИ. В дальнейшем студенты будут работать на специализированных станциях СИ. Кроме учебных работ, станция может быть использована для тестовых экспериментов при подготовке исследований на основных станциях, для отладки и тестирования отдельных узлов станций СИ.

### ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ТССИ

Многоцелевая станция с модульным оснащением дает возможность собирать различные экспериментальные схемы; устанавливать для тестирования новые элементы и узлы; вскрывать различные узлы для демонстрации.

Пучок СИ выводится из накопителя по вакуумному каналу через две стены биозащиты. Апертура канала обеспечивает вывод пучка размером  $40 \times 20$  мм. Основные элементы канала и станции представлены на рис. 1 и 2.

Для разделения вакуума в канале установлены бериллиевые фольги. Между бериллиевыми фольгами в канале, а также в первой и второй экспериментальных камерах, создается вакуум до уровня 1–10 Па. Предусмотрена возможность напуска гелиевой атмосферы в эксперименталь-

ные камеры. Уплотнения на камере выполняются с возможностью многократного вскрытия для обслуживания и демонстрации. В третьей камере предполагается проведение экспериментов без вакуумирования. Все вскрываемые люки и фланцы будут оснащены концевиками для обеспечения радиационной безопасности путем блокировки радиационных затворов и исключения попадания работников под излучение.

В первой камере размещаются устройства формирования и мониторинга пучка СИ. Подвижные ножи из тантала, ограничивающие горизонтальный и вертикальный размеры пучка, установленные на дистанционно-управляемых прецизионных подвижках, предназначены для формирования вертикального и горизонтального размеров пучка (рис. 1, поз. 8 и 10). Блок щелей (рис. 1, поз. 8) будет использоваться для мониторинга входного пучка СИ. Вертикальные ножи, установленные на изоляторах и оснащенные выводом для регистрации фотоэмиссионного тока, возникающего при попадании СИ на нож, будут выполнять роль электродов фотоэмиссионного датчика положения пучка. Разница в силе тока верхнего и нижнего ножей пропорциональна долям пучка на соответствующем ноже и может быть использована для юстировки ножей симметрично в пучке и последующего монитори-

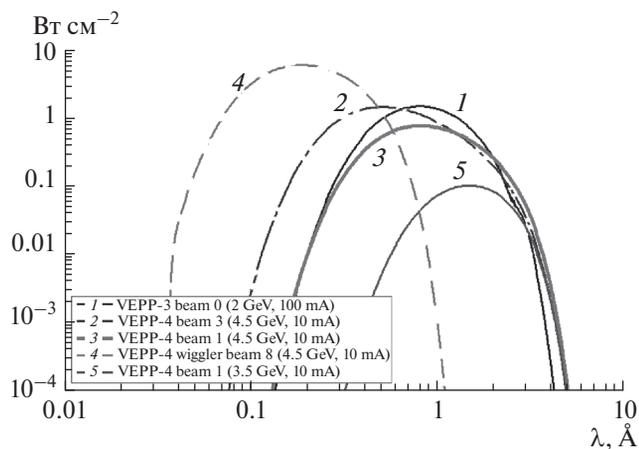


Рис. 3. Сравнение спектров мощности потоков СИ для типичных режимов работы.

рования изменения положения пучка СИ. Разрезной кристалл-“бабочка” Si (111) на моторизованном гониометре (рис. 1, поз. 9) обеспечивает монохроматизацию СИ в спектральном диапазоне 0.4 до 6.2 Å (от 31 до 2 кэВ), с разрешением  $\Delta E/E \sim 2 \cdot 10^{-4}$ . Установленный после монохроматора люминофорный датчик (вводимый в пучок под углом 45°) с видеокамерой (рис. 1, поз. 11) будет использоваться для контроля формируемого пучка СИ.

Вторая вакуумная камера представляет собой куб с ребром 550 мм из нержавеющей стали. Внутри размещаются две линейные подвижки ХУ (рис. 1, поз. 13) для позиционирования в пучке образца, а также другие необходимые вспомогательные элементы. В этой камере можно реализовать трафаретную рентгенолитографию, исследование люминофоров или рентгенофлуоресцентный анализ, используя один комплект подвижек с перестановкой в соответствующие позиции.

Основные элементы станции строятся с использованием прецизионных подвижек произ-

водства Newport с управлением от ЭВМ, что позволяет реализовать оперативную смену элементов и алгоритмов перемещения.

В настоящее время из фронтенда канала выведен пучок излучения в Бункер СИ ВЭПП-4М, ведутся работы по конструированию и сборке элементов станции (корпуса и внутреннего оснащения экспериментальных камер и вакуумного канала).

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Источником излучения для строящейся станции является поворотный магнит N10F. В режиме работы накопителя ВЭПП-4М в качестве источника СИ для пользователей энергия электронов составляет 1.85 ГэВ для работы метрологического канала или 4.5 ГэВ для работы остальных пользователей. В режиме ФЭЧ энергия электронов выбирается в диапазоне от 1.85 до 4.5 ГэВ. На рис. 3 представлены для сравнения спектры мощности потоков СИ в медианной плоскости для типичных режимов работы: 1 – излучение, используемое на экспериментальных станциях на ВЭПП-3 при энергии электронов  $E = 2$  ГэВ, токе  $I = 100$  мА; 2 – излучение используемое в канале № 3 ВЭПП-4М,  $E = 4.5$  ГэВ,  $I = 10$  мА; 3 – излучение в канале № 1 ВЭПП-4М на Технологической станции,  $E = 4.5$  ГэВ,  $I = 10$  мА; 4 – излучение из 9-полюсного вигглера в канале № 8 ВЭПП-4М,  $E = 4.5$  ГэВ,  $I = 10$  мА; 5 – излучение в канале № 1 ВЭПП-4М на Технологической станции,  $E = 3.5$  ГэВ,  $I = 10$  мА. В табл. 1 приведены значения критической энергии и критической длины для различных режимов работы накопителя ВЭПП-4М. Из приведенных данных видно, что при энергии электронов в кольце ВЭПП-4М 4.5 ГэВ (типичный режим работы с СИ) излучение в 1-м канале слабее в несколько раз, с учетом разницы значений тока, чем на 0-м канале ВЭПП-3 при близком спектре, это позволяет реализовать основные технологии исследования вещества с применением СИ, используемые на накопителе ВЭПП-3.

Таблица 1. Зависимость параметров СИ от энергии электронов в накопителе

Энергия электронов, ГэВ	Магнитное поле в точке излучения, кГс	Критическая энергия $E_c$ , кэВ	Критическая длина волны $\lambda_c$ , Å
6	5.79	13.9	0.89
4.5	4.34	5.86	2.11
4	3.86	4.12	3.01
3.5	3.38	2.76	4.49
3	2.90	1.74	7.14
2.5	2.41	1.01	12.3
1.85	1.79	0.41	30.4

## ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И УЧЕБНЫЕ РАБОТЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ СИ

Модульная концепция построения многоцелевой станции дает возможность собирать различные экспериментальные схемы, устанавливать для тестирования новые элементы и узлы, вскрывать различные узлы для демонстрации и проводить эксперименты по физике ускорителей и изучению свойств СИ, а также изучать методики применения СИ в исследованиях вещества. Также станция может быть использована для тестирования нового экспериментального оборудования на СИ и выполнения некоторых вспомогательных экспериментов. Предполагается проведение экспериментов в наиболее простой конфигурации, заведомо не охватывающей всех возможностей рентгеновских дифракционных и спектральных методов с использованием СИ, но дающей возможность ознакомиться с основами тех или иных методик или протестировать новые устройства. На базе ТССИ студентами будут выполняться курсовые и дипломные работы по тематикам базовых исследований на синхротронном излучении, в ходе выполнения которых будут рассматриваться приемы формирования и контроля пучков СИ, принципы работы экспериментальных станций, основы организации проведения экспериментов с СИ и техники безопасности при работе с СИ. К выполнению дипломных работ будут привлекаться научные руководители из числа квалифицированных специалистов для постановки полномасштабной задачи. Хотя меньший поток излучения, по сравнению с ВЭПП-3, не позволит конкурировать с существующими станциями, но появляется возможность правовередения подготовительных работ, не используя дефицитное пучковое время на основных станциях. Реализуемые на Технологической станции методики базируются на опыте работ на исследовательских станциях ЦКП СЦСТИ [3–6]. Ниже представлены тематика проведения учебно-исследовательских работ:

### *1. Подготовка и мониторинг пучка СИ*

В первой экспериментальной камере размещаются блок управляемых щелей для регулировки размера пучка СИ, монохроматор на основе разрезного кристалла Si (111) и устройства мониторинга пучка — люминофорный, проволочный датчики, запоминающий экран. На этой аппаратуре будут выполняться работы по первичной подготовке пучка к эксперименту и изучению методов контроля положения и профиля пучка СИ.

### *2. Исследование люминесценции*

Измерение времени и спектра высвечивания разнообразных люминофоров также могут быть предметом учебных и курсовых работ для студентов профильных кафедр. Эти измерения можно проводить при помощи фотоумножителя для качественной демонстрации разницы времени высвечивания органических, порошковых и кристаллических сцинтилляторов, а также спектрального состава излучения этих веществ. Однако возможно и оснащение станции специализированной аппаратурой на основе электронно-оптического диссектора, по аналогии с той, что используется в настоящее время на ВЭПП-3 на станции “Люминесценция с временным разрешением”. Особенностью СИ на ВЭПП-4М является длительность импульса на уровне 100 пс (FWHM), что позволяет проводить эксперименты с более широким классом сцинтилляторов, чем на ВЭПП-3.

### *3. Практикум по детекторам*

Во второй или третьей камере можно размещать различные детекторы СИ, в том числе разрабатываемые в ИЯФ (запоминающие экраны, полупроводниковые детекторы, ионизационные камеры) и исследовать их работу с возможностью сравнения между собой.

### *4. Основы рентгенофлуоресцентного анализа*

Во второй камере может быть размещен детектор AMPTEK XRA100SDD для реализации рентгенофлуоресцентного анализа. Возможность вакуумирования камеры позволит расширить диапазон исследования области более легких материалов, по сравнению со станцией РФА на накопителе ВЭПП-3. В ходе учебных работ будет рассматриваться взаимодействие СИ с веществом, принципы пробоподготовки, методика проведения эксперимента, получение РФА спектров, обработка экспериментальных данных.

### *5. Рентгеновская литография*

С использованием прецизионных подвижек, размещенных во второй камере, будет проводиться экспонирование полимерных резистов через рентгеношаблон с последующей обработкой резистов на оборудовании в лабораторной чистой комнате, размещенной вблизи ТССИ. Целью данной работы будет знакомство с принципами рентгенолитографии, изучение взаимодействия СИ с полимерными резистами, исследование влияния параметров облучения на формируемые структуры.

### 6. Дифракционные исследования

В третьей камере будет устанавливаться хорошо зарекомендовавший себя в работе одноординатный детектор, производства ИЯФ СО РАН для демонстрации практических основ дифракционных исследований на СИ.

### 7. Диагностика пучков

Дистанционно управляемый блок вертикальных щелей в первой камере позволит проводить измерение поперечных размеров пучка с помощью техники камеры-обскуры на люминоформном экране и ПЗС-матрицы во второй камере. Существует перспектива оснащения канала вывода СИ в месте прохождения сквозь биологическую защиту вакуумированной вставкой с дистанционно управляемой подвижкой, позволяющей вводить в пучок СИ диафрагмы разного диаметра для реализации камеры-обскуры с увеличением. Кроме того, “белый” пучок СИ также может применяться для исследования свойств излучения, например, измерения зависимости мощности СИ от энергии пучка электронов и исследования углового распределения в зависимости от энергии гамма-квантов. Монохроматизированное излучение СИ может быть использовано для построения изображения пучка при помощи рефракционной оптики либо для экспериментов по интерференции света в области мягкого рентгеновского излучения. В настоящее время измерения параметров пучка с использованием СИ рентгеновского диапазона в ИЯФ СО РАН практически не развиты.

Однако переход в эту область для измерения поперечных размеров пучка становится актуальным в связи с планами строительства ЦКП “СКИФ”. Предлагаемую станцию можно использовать для тестирования перспективных диагностик пучка, которые планируется применять ЦКП “СКИФ”.

В дальнейшем, по мере выполнения обозначенных программ, возможна реализация на Технологической станции иных методов исследований.

Работа выполняется с использованием инфракрасной структуры ЦКП Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения (СЦСТИ) на базе накопительного комплекса ВЭПП-3—ВЭПП-4М (Новосибирск, РФ), поддержанного Министерством Образования и Науки РФ (проект RFMEFI62117X0012).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., Zhuravlev A.N. // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 19.
2. Pustovarov V., Ivanov V., Kruzhalov A. et al. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Section A. 2007. V. 575. № 1–2. P. 172.
3. Kudryavtsev V.N., Maltsev T.V., Shekhtman L.I. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Sect. A. 2017. V. 845. P. 289.
4. Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракшун Я.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 2. С. 204.
5. Goldenberg B.G., Lemzyakov A.G., Nazmov V.P., Pindyurin V.F. // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 205.
6. Meshkov O.I., Zhuravlev A.N., Smaluk V.V. // JINST. 2010. V. 5. P. 03004.