

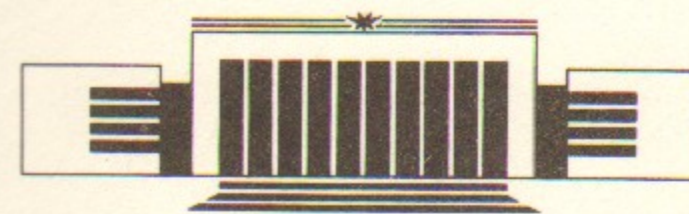


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Г. Н. Кулипанов

**ИСТОЧНИКИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И РАЗРАБОТКА ВИГГЛЕРОВ
И ОНДУЛЯТОРОВ В ИЯФ СО АН СССР**

ПРЕПРИНТ 90-135



НОВОСИБИРСК

ИСТОЧНИКИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И РАЗРАБОТКА
ВИГГЛЕРОВ И ОНДУЛЯТОРОВ В ИЯФ СОАН СССР
(Лекция, прочитанная на Международном симпозиуме
"X-ray SR and Advanced science and technology")

15-16 февраля 1990 г., Кобе, Япония.

Г. Н. Кулипанов
Институт ядерной физики СОАН СССР
630090, Новосибирск, СССР

АННОТАЦИЯ:

Приведены характеристики и рассмотрены особенности существующих и создаваемых в Институте ядерной физики СОАН СССР (Новосибирск) накопителей электронов и позитронов - источников синхротронного излучения. Рассматриваются перспективы развития источников СИ, обсуждаются возможности новых проектов: Сибирь-3 на базе накопителя с энергией 10 ГэВ и Сибирь-4 на базе накопителя с энергией 2,4 ГэВ со сверхпроводящими магнитами с полем 6 Т.

Описаны созданные для накопителей ИЯФ СО АН СССР различного рода вигглеры и ондуляторы (электромагнитные, сверхпроводящие, на основе постоянных магнитов). Рассмотрены различные схемы постановки и варианты использования вигглеров и ондуляторов на источниках синхротронного излучения и в лазере на свободных электронах - оптическом клистроне, предложенном и созданном в ИЯФ СОАН СССР.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основной характеристикой, определяющей потребительскую ценность любого источника излучения, является его спектральная яркость (B_λ), равная числу фотонов (N_ϕ), излучаемых в данном спектральном интервале ($\Delta\lambda/\lambda$) в единицу времени (Δt) с единицы площади источника (ΔS) в единицу телесного угла ($\Delta\Omega$)

$$B_\lambda = \frac{N_\phi}{\Delta\lambda/\lambda \cdot \Delta t \cdot \Delta S \cdot \Delta\Omega}$$

Яркость определяет время проведения самых различных экспериментов и технологических операций [1].

На рис. 1 представлена популярная сейчас диаграмма, показывающая историю, современное состояние и планы увеличения яркости рентгеновских источников. Начиная со времени открытия рентгеновских трубок, их яркость эволюционным образом была повышена примерно лишь в 100 раз за 60 лет. Использование электронных синхротронов, а затем электрон-позитронных накопителей в качестве источников рентгеновского синхротронного излучения позволило мировому сообществу, начиная с 70-х годов, проводить целенаправленную работу по революционному повышению яркости рентгеновских источников. Переход с синхротронов на накопители повысил яркость примерно в 10^2-10^3 раз. Дальнейшее повышение яркости осуществлялось за счёт использования для генерации рентгеновского излучения многополюсных вигглеров, создающих на достаточно длинном участке орбиты знакопеременное магнитное поле, позволяющее собрать излучение с большой длины в один пучок, увеличив его интенсивность в n раз ($n = 10^1 + 10^2$ число полюсов). Создание специализированных накопителей - источников СИ второго поколения, позволило уменьшить эмиттанс электронных (позитронных) пучков, а следовательно уменьшить площадь источника излучения и повысить яркость еще приблизительно на порядок. Источники СИ третьего поколения, имеющие еще меньший эмиттанс и большую энергию, позволяют использовать в качестве источников рентгеновского излучения ондуляторы, дающие, благодаря интерференции излучения из всех полюсов ондулятора, квазимонохроматическое излучение с монохроматичностью $\Delta\lambda/\lambda \sim 1/n$ и спектральной яркостью, большей по сравнению с излучением из поворотных магнитов в n^2 раз.

Учитывая, что сейчас используются ондуляторы с $n \sim 10^2$, а в ближайшем будущем планируются сверхдлинные ондуляторы с $n = 10^3 + 10^4$, можно уверенно предсказывать и на следующие 10 лет повышение яркости рентгеновских источников в 10^3-10^4 раз - как и

показано на рис. 1. На этой диаграмме относительно среднемировой линии приведены также яркости существующих, создаваемых и проектируемых в Институте ядерной физики (Новосибирск) источников синхротронного излучения.

II. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ИЯФ СО АН СССР В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

За тридцать лет в Институте было создано целое семейство накопителей электронов и позитронов (ВЭП-1, ВЭПП-2, ВЭПП-3, ВЭПП-2М, ВЭПП-4, БЭП), разрабатываемых для проведения исследований по физике элементарных частиц на встречных пучках. На базе накопителей ВЭПП-2М, ВЭПП-3 и ВЭПП-4 создан Сибирский центр синхротронного излучения [2]. В таблице 1 приведены основные параметры накопителей, на рис. 2 - 4 показано размещение экспериментальных станций на пучках СИ. Список экспериментальных станций и количество групп, работающих на этих станциях, приведены в табл. 2. Суммарно в настоящее время в Сибирском центре СИ работает более 100 групп из институтов и организаций Новосибирска, других городов Советского Союза (Москва, Ленинград, Владивосток, Свердловск, Красноярск, Ереван и т. д.), зарубежных стран (Германия, Чехословакия, Болгария, Польша, Венгрия, Англия, Индия, Китай) [3, 4].

Электрон-позитронный накопитель ВЭПП-2М с 1974 года используется как источник вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского синхротронного излучения в паразитном режиме с экспериментами на встречных пучках. Для генерации ондуляторного излучения с $\lambda \sim (300-100)\text{Å}$ на накопителе в 1980 году был установлен спиральный электромагнитный ондулятор с периодом 2,4 см. [5], затем в 1983 г. он был заменен на сверхпроводящий [6]. В течение долгого времени это был единственный в мире источник ондуляторного излучения, имеющий круговую поляризацию. С 1984 года на накопителе успешно работает пятиполюсный сверхпроводящий вигглер с рекордным полем 8 т. [7], позволивший вести работы с синхротронным излучением в области $\lambda = 3 - 10 \text{Å}$. Постановка такого вигглера на накопитель с энергией 0,65 ГэВ потребовала решения целого ряда сложных ускорительных задач. В последние годы на накопителе ВЭПП-2М проведена модернизация, которая позволит улучшить его экспериментальные возможности.

Накопитель ВЭПП-3, являющийся бустером для накопителя

ВЭПП-4, используется как источник рентгеновского синхротронного излучения с 1973 года. Один из его длинных прямолинейных промежутков, начиная с 1979 года использовался для работы с вигглерами и ондуляторами.

Первый в мировой практике сверхпроводящий двадцати-полюсный вигглер с полем 3,3 т, установленный на ВЭПП-3 в 1979 г., позволил увеличить яркость рентгеновского пучка СИ в области $\lambda \sim 1\text{Å}$ в 200 раз [8].

Начиная с 1979 года накопитель ВЭПП-3 использовался и для работы с оптическим клистроном - модификацией лазера на свободных электронах [9]. Последовательно в 1979 - 1985 гг. на накопителе были установлены различные модификации ондуляторов на основе постоянных магнитов ОК-1, ОК-2 и ОК-3 (см. табл. 6). В 1987 году для работы с оптическим клистроном был создан специализированный прямолинейный промежуток - байпас, проходящий параллельно основному прямолинейному промежутку (см. рис. 3). Байпас используется для работы с электронным пучком только до энергии 500 МэВ. В связи с этим магнитные элементы байпаса существенно короче элементов основного промежутка ВЭПП-3, рассчитанного для работы на энергию 2,2 ГэВ. Это позволило на байпасе получить свободное пространство порядка 8 метров для установки магнитной системы оптического клистрона - двух электромагнитных ондуляторов длиной 3,5 м каждый и группирователя. В 1988 году на оптическом клистроне байпаса ВЭПП-3 была получена генерация в диапазоне 6900 Å - 2400 Å. Это первый ЛСЭ, работающий в ультрафиолетовой области [10].

Для будущих работ по рентгеновской голографии на ондуляторном излучении представляет интерес предложенная и реализованная на байпасе ВЭПП-3 схема получения взаимно когерентного излучения из двух ондуляторов, разделенных ахроматическим поворотом [11].

В настоящее время ВЭПП-3 используется для работ с оптическим клистроном, экспериментов с рентгеновским синхротронным излучением [2-4], экспериментов по ядерной спектроскопии на внутренней мишени [12] и экспериментов по фотоядерной физике на пучке γ -квантов, получаемых с помощью обратного комптоновского рассеяния [13].

Накопитель ВЭПП-4 в течение 1979 - 1985 гг. использовался для экспериментов с жестким рентгеновским синхротронным излучением в паразитном режиме, параллельно с экспериментами на встречных пучках. В настоящее время заканчивается модернизация ВЭПП-4, которая включает создание специальных промежутков в полукольцах накопителя

для постановки вигглеров и ондуляторов. Рядом с тоннелем ВЭПП-4 ведется строительство защищенного бункера общей площадью ~ 1200 м², куда будут выведены пучки синхротронного излучения, установлено порядка двадцати экспериментальных станций, организованы специальные лабораторные помещения для экспериментальных групп (см. рис. 4).

III. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ СИ ДЛЯ ДРУГИХ РЕГИОНОВ СТРАНЫ

В Институте ядерной физики СО АН СССР разработаны также специализированные и более эффективные источники СИ - накопители электронов «Сибирь-1» [14] и «Сибирь-2» [15]. Малый накопитель «Сибирь-1» является источником вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения, большой накопитель «Сибирь-2» предназначен для исследований в жесткой рентгеновской области. При этом малый накопитель служит бустером для инжекции в большой накопитель.

Первый накопитель «Сибирь-1» был изготовлен в ИЯФ СО АН СССР и начал работу в ИАЭ им. И. В. Курчатова в 1983 г. На рисунке 5 приведена схема накопителя, основные параметры приведены в табл. 3. Накопитель имеет слабофокусирующую магнитную структуру, максимальная энергия 450 МэВ, инжекция осуществляется на энергии (35-60) МэВ. Несмотря на относительно малую энергию инжекции, на накопителе «Сибирь-1» осуществляется многократное накопление электронов до тока 360 мА при разовом захвате не более 20 мА. Подъем энергии в накопителе с энергии инжекции до максимальной энергии осуществляется за несколько секунд.

Для накопителя «Сибирь-1» был специально разработан и изготовлен трехполюсный вигглер с полем 4.3 т., основные его параметры приведены в табл. 5.

На накопителе «Сибирь-1» может быть установлено десять каналов вывода синхротронного излучения из поворотных магнитов с $\lambda = 61 \text{ \AA}$ и один канал из сверхпроводящего вигглера с $\lambda = 21 \text{ \AA}$. Начиная с 1985 г. на накопителе «Сибирь-1» ведутся систематические эксперименты с использованием СИ на пяти экспериментальных станциях.

Накопитель «Сибирь-1» является частью комплекса установок, в состав которого входят также (см. рис. 6) инжектор - линейный

ускоритель на энергию 80-100 МэВ, два канала транспортировки электронных пучков, большой накопитель «Сибирь-2» с максимальной энергией 2.5 ГэВ. Накопитель «Сибирь-2» будет иметь до 40 каналов вывода СИ из поворотных магнитов, а также из змеек и ондуляторов, расположенных в девяти прямолинейных промежутках, имеющих каждый длину ~ 3м. Другие три прямолинейных промежутка предназначены для постановки системы впуска электронов и размещения ВЧ-резонаторов. Основные параметры накопителя «Сибирь-2» приведены в табл. 3, в табл. 4 приведены параметры вигглеров и ондуляторов, создаваемых для накопителя «Сибирь-2» в ИАЭ им. И. В. Курчатова.

К середине 1991 года должен быть закончен монтаж всех систем накопителя «Сибирь-2» и к концу 1991 года начаты работы по инжекции пучка в накопитель.

Проект накопителя электронов с энергией 1.2 - 1.5 ГэВ - специализированного технологического источника синхротронного излучения для центра микроэлектроники был предложен нами на конференции SRI-82 [16]. Проект предусматривал комплексное решение вопросов субмикронных технологий и субмикронного материаловедения:

- массовое, дешевое тиражирование приборов с субмикронными структурами (0.7 - 0.1 мкм) с помощью рентгенолитографии, требующей ярких пучков мягкого рентгеновского излучения в области $\lambda = (4-40) \text{ \AA}$ из поворотных магнитов и специальных литографических вигглеров;
- реализацию сухих низкотемпературных технологических процессов нанесения и травления различных оксидных и металлических пленок с помощью фотоиндуцированных процессов в газовой фазе, использующих мощные пучки излучения в области $\lambda = (2500 - 100) \text{ \AA}$ из ондуляторов;
- экспрессные методы анализа и дефектоскопии используемых материалов и самой технологии создания приборов субмикронной электроники с помощью ярких пучков рентгеновского излучения $\lambda = (0.5 - 4) \text{ \AA}$ из сверхпроводящих вигглеров с полем 7 т.

Реализация проекта для Министерства электронной промышленности СССР была начата в 1986 году. Местом размещения был выбран г. Зеленоград, расположенный в тридцати километрах от Москвы, являющийся советским аналогом «кремниевой долины». Строительство здания должно быть закончено в 1990 году, в начале 1991 г. предполагается начать монтаж оборудования, и в конце 1991 года - работы по запуску линейного ускорителя - инжектора, бустера и основного накопителя.

В проекте были использованы основные элементы магнитной сис-

темы и структура создаваемого нами накопителя «Сибирь-2», использована та же инжекционная система. Параметры накопителя «Зеленоград» приведены в табл. 3, параметры вигглеров и ондуляторов в табл. 4.

IV. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ИЯФ СО АН СССР

Накопители электронов и позитронов, созданные и разработанные в Институте за тридцать лет (ВЭП-1, ВЭПП-2, ВЭПП-3, ВЭПП-2М, ВЭПП-4, «Сибирь-1», БЭП, «Сибирь-2», «Зеленоград») безусловно отличаются друг от друга как по параметрам, так и по конструктивному исполнению. Однако, имеются некоторые общие решения, которые их объединяют и делают отличными от традиционно используемых в других странах. Это не означает, что наше решение всегда наилучшее, скорее это наши особенности, определяемые технологическими и экономическими возможностями Института, его традициями, многолетним опытом работы с накопителями. Рассмотрим эти особенности:

а) В качестве инжекторов в основные накопители используются не бустеры - синхротроны, а бустеры - накопительные кольца (ВЭПП-2, а затем БЭП для ВЭПП-2М; ВЭПП-3 для ВЭПП-4; «Сибирь-1» для «Сибирь-2»). В бустерах - накопителях проводится предварительное накопление электронов или позитронов, получение нужного числа сгустков, подъем энергии до необходимого значения. Благодаря радиационному затуханию в бустерах - накопителях инжектируемые из них пучки электронов или позитронов имеют малый фазовый объем, что позволяет в основных накопителях уменьшить апертуру до величины, определяемой лишь требованиями времени жизни, а не инжекционными требованиями. Помимо уменьшения стоимости основного накопителя, это позволяет устанавливать на основной накопитель вигглеры и ондуляторы с малой апертурой (например, в спиральном ондуляторе на ВЭПП-2М внутренний диаметр вакуумной камеры ~ 8 мм). Относительно медленное увеличение энергии в бустерах - накопителях и малая частота циклов инжекции компенсируется большим накопленным током.

б) Поворотные магниты основных накопителей изготавливаются, как правило, из нешихтованной магнитомягкой стали типа АРМКО. Значение величин магнитных полей в поворотных магнитах на максимальных энергиях выбирается достаточно высоким: на ВЭПП-2М $B_0 = 1,9$ т., на БЭП $B_0 = 2,1$ т., на «Сибирь-2» $B_0 = 1,7$ т.

Диапазон изменения рабочих полей в накопителях при использовании низкоэнергетичной инжекции обычно достаточно большой ($\frac{B_{max}}{B_{min}} \sim 8$ для ВЭПП-3, $\frac{B_{max}}{B_{min}} \sim 10$ для «Сибирь-1»).

в) Для обеспечения нормального согласования сильнополюсовых вигглеров или длинных ондуляторов с магнитной структурой накопителей используется либо раздельное питание квадрупольных линз как на байпасе ВЭПП-3, либо достаточно сильные коррекции градиента в квадрупольных линзах как на ВЭПП-2М и «Сибирь-2».

г) Для компенсации хроматизма используется специальная коррекция формы полюсов в квадрупольных линзах и семейство менее сильных сосредоточенных секступолей для регулировки хроматизма (ВЭПП-3, БЭП).

д) Для контроля величины и знака кубической нелинейности частот бетатронных колебаний используются семейства октупольных линз (ВЭП-1, ВЭПП-3, ВЭПП-4, «Сибирь-1»).

е) При накоплении больших токов в накопителях ВЭПП-3, «Сибирь-1», байпасе ВЭПП-3 для подавления неустойчивостей когерентных бетатронных колебаний корректируются не только величины хроматизма и кубической нелинейности, но и задаются их «правильные» знаки [17,18]. Это позволяет получать режим быстрого затухания когерентных бетатронных колебаний при инжекции, что обеспечивает, например, на «Сибирь-1» накопление частиц с частотой 0,5 гц при времени радиационного затухания 2 - 5 сек.

ж) На накопителях ИЯФ СО АН СССР используются, в основном, длинноволновые ВЧ-резонаторы ($f \sim 180$ Мгц), что не позволяет получать предельно короткие длины сгустков, но дает возможность легко реализовать односгустковый режим с током ~ 100 мА/сгусток.

з) В целях максимального использования длин прямолинейных промежутков токовые коммутации на поворотных магнитах и квадрупольных линзах выполняются в центре элементов, а не на краях. С этой же целью все участки вакуумной камеры соединяются сваркой, а не с помощью фланцев.

и) Использование специальной конфигурации катушек питания поворотных магнитов на накопителях «Сибирь-2» и «Зеленоград» [19] позволяет при неизменном зазоре между полюсами иметь на краю магнита участок с полем, равным $1/4$ от максимального. Это дает возможность разделить излучение из магнитов и ондуляторов, расположенных в прямолинейных промежутках, а также уменьшить тепловой поток излучения с краев магнитов в прямолинейный промежуток, в котором установлены сверхпроводящие устройства.

требующие глубокого охлаждения.

V. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВИГГЛЕРОВ И ОНДУЛЯТОРОВ В ИЯФ СО АН СССР

В Институте ядерной физики СО АН СССР начиная с 1978 года разработано и создано достаточно большое число вигглеров и ондуляторов. Развивались различные технологии для создания этих устройств:

- на основе сверхпроводящих магнитов (табл. 5)
- на основе постоянных магнитов (табл. 6)
- на основе обычных электромагнитов (табл. 7).

Выбор конструкции вигглеров и ондуляторов и типа магнитных структур зависит с одной стороны от потребительских требований к змейкам и ондуляторам, как оптическим источникам, а с другой стороны от ускорительных требований как к элементам магнитной структуры накопителя. Кроме того, этот выбор определялся и другими причинами (стоимость, наличие материалов, традиции и т. д.)

1) Особенности конструкций сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов .

Как правило , во всех конструкциях сверхпроводящих устройств используются магнитные сердечники и магнитное ярмо из железа. Это позволяет увеличить поле в зазоре на $\Delta B = (1.5 - 1.8)T$, уменьшить рассеянные магнитные поля, уменьшить величину запасенной энергии. В сильнополевых вигглерах используются секционированные последовательно соединенные катушки . При этом для внутренней катушки используется провод большего диаметра, что позволяет уменьшить плотность тока в витках, находящихся в максимальном магнитном поле.

В вигглерах используются вакуумные камеры, охлаждаемые до азотной температуры. Благодаря этому части вигглера, находящиеся при гелиевой температуре, закрыты от пучка и устраняется возможность их разогрева за счёт попадания СИ, либо за счёт когерентных потерь энергии пучка. С другой стороны по сравнению со случаем тёплой вакуумной камеры уменьшается требуемый межполюсный зазор из-за отсутствия дополнительных азотных экранов. Для охлаждения поглотителей СИ, расположенных внутри таких вакуумных камер применяется специальный хладагент (водка), имеющий более низкую температуру замерзания по сравнению с водой.

Излучение из вигглеров, как правило, используется одновременно

большим числом экспериментальных станций (например, девять станций на вигглере ВЭПП-3). Для этого у сильнополевых вигглеров (shifters), предназначенных для повышения жёсткости излучения (ВЭПП-2М, «Сибирь-1», «Зеленоград») необходимо было решить проблему «второго» источника, т.е. устранить возможность попадания излучения на какую-либо экспериментальную станцию одновременно с двух участков вигглера. На ВЭПП-2М для этого используется коллимация с помощью дополнительных приёмников излучения, что, правда, ограничивает число экспериментальных станций. Для накопителя «Зеленоград» создаётся специальная конструкция с длинными краевыми полюсами, создающими магнитное поле порядка 1/10 от поля в центральном полюсе. В этом случае излучение из «второго» источника существенно мягче по спектру и легко устраняется поглощением в бериллиевых-разделительных фольгах.

2) Особенности конструкций ондуляторов на основе постоянных магнитов.

Все конструкции ондуляторов ОК-1, ОК-2 и ОК-3 используют железо для замыкания обратного потока и уменьшения рассеянных магнитных полей. В конструкции ОК-2 (1981 г.) [25] впервые был использован принцип продольной концентрации магнитного потока с помощью железных полюсов. Известные как «гибридные», они нашли широкое применение не только для генерации ондуляторного излучения, но и в магнитных системах ЛСЭ. В отличие от конструкции ОК-2 «гибридные» ондуляторы, создаваемые позднее в других центрах, не содержат неподвижных тонких полюсов, находящихся под нулевым потенциалом. Наличие таких полюсов в ОК-2 позволяет независимо изменять зазор между основными полюсами на любом участке ондулятора, не изменяя поле в других частях (см. рис. 7).

В конструкции ОК-3 (1984 г.) [26] использована клиноподобная форма основных и нейтральных полюсов, позволяющая уменьшить рассеянные поля по сравнению с конструкцией ОК-2 и более оптимально использовать магнитный материал.

3) Особенности конструкций ондуляторов на основе обычных электромагнитов.

В длинных ондуляторах байпасса ВЭПП-3 подбором продольного профиля полюсов ондулятора подавлена третья гармоника поля до величины менее 3%. Это сделано для минимизации вклада магнитного поля ондуляторов в кубическую нелинейность.

Для возбуждения поля в ондуляторах байпасса ВЭПП-3 используется дешёвая в изготовлении и простая в эксплуатации

конструкция, состоящая из восьми периодически изогнутых медных шин с отверстием для воды. Коммутация осуществляется по торцам, используется сильноточное питание.

4) Способы минимизации влияния вигглеров и ондуляторов на пучок в накопителе.

Постановка сильнополевых «змеек» и длинных ондуляторов оказывает существенное влияние на движение частиц в накопителе. Наиболее заметными являются следующие эффекты:

- сдвиг частот вертикальных бетатронных колебаний из-за краевой фокусировки ($\Delta v_z = 0,12$ для вигглера на ВЭПП-2М, $\Delta v_z = 0,23$ для ондуляторов на байпасе ВЭПП-3);

- сдвиг частот горизонтальных бетатронных колебаний из-за развала магнитного поля змейки в горизонтальном направлении и появления градиента поля на орбите пучка в вигглере ($\Delta v_x / \Delta v_z = 1/15$ для вигглера ВЭПП-3);

- появление зависимости частот бетатронных колебаний от амплитуды ($\partial v_z / \partial a^2 = 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ для ондуляторов байпаса ВЭПП-3) и соответствующее уменьшение динамической апертуры.

Для пераспределения величин сдвигов частот бетатронных колебаний Δv_z и Δv_x , как, например, на накопителе «Сибирь-1» либо для зануления Δv_x на предельных полях, как на ВЭПП-2М, в конструкциях вигглеров используется горизонтальное смещение центров полюсов вигглера [7].

Для минимизации влияния вигглеров и ондуляторов на движение частиц в накопителе необходимо рассматривать их как обычные элементы магнитной структуры, требующие стандартной ускорительной процедуры согласования. Для этого в каждой из квадрупольных линз элемента периодичности закладывается либо индивидуальное питание, как на байпасе ВЭПП-3, либо используются независимые сильноточные корректирующие градиентные катушки, как на ВЭПП-2М.

Кроме того, для постановки сильнополевых вигглеров, как правило, используются промежутки с малой β -функцией (для ВЭПП-2М $\beta_z = 5 \text{ см}$, для «Сибири-2» $\beta_z = 25 \text{ см}$), что существенно уменьшает их вклад в сдвиг частот и нелинейности.

Для компенсации зависимости частот бетатронных колебаний от амплитуды используются семейства октапольных линз. Без такой компенсации на байпасе ВЭПП-3 работать было невозможно, т.к. в широком диапазоне частот бетатронных колебаний наблюдались сильные резонансы третьего и четвертого порядков.

VI. РАЗРАБОТКА КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Для массового производства приборов микроэлектроники с субмикронными размерами, требующего реализации технологии рентгенолитографии, необходимо создание большого числа относительно компактных надёжных источников рентгеновского излучения с $\lambda \sim 10 \text{ \AA}$.

В качестве прототипа компактного источника СИ для рентгенолитографии может рассматриваться накопитель БЭП с обычными тёплыми магнитами [20], недавно начавший работать в ИЯФ СО АН СССР. Параметры накопителя приведены в табл. 8, схема накопителя показана на рис. 8. Отличительной чертой этого накопителя является использование магнитов с полюсами, выполненными в виде концентратора с большими фасками в поперечном сечении. В результате достигается поле 2,1 т., что позволяет иметь энергию 850 МэВ при полном периметре орбиты 22,3 метра. Магнитная система БЭП состоит из 12 периодов, каждый из которых представляет собой ФОДО ячейку. Конструктивно достаточно просто организовать вывод излучения из каждого из двенадцати поворотных магнитов. При использовании в качестве инжектора синхротрона с энергией 200 МэВ [23], который сейчас разрабатывается и может быть установлен внутри кольца БЭП, накопителя такого типа могут по компактности вполне конкурировать с накопителем на основе сверхпроводящих магнитов.

В последние годы в ИЯФ СО АН СССР совместно с НПО «Вакууммашприбор» (Москва) разрабатывается компактный накопитель «Сибирь-СМ» [21] на энергию 600 МэВ с периметром орбиты 10 м, который содержит 8 сверхпроводящих магнитов с плоско-параллельными краями на поле 6 Т. Общий вид накопителя показан на рис. 9, а его основные параметры приведены в табл. 8.

Наиболее сложным элементом накопителя является сверхпроводящий поворотный магнит с плоско-параллельными краями рассчитанный на поле 6 Т. Главной особенностью магнита, отличающей его от известных конструкций, является применение клиновидной сверхпроводящей обмотки, позволяющей максимально использовать магнитные свойства железа для получения однородного поля в рабочем зазоре, формирования хорошего краевого поля и замыкания обратного магнитного потока.

Такой магнит имеет малую энергоёмкость, отсутствие рассеянных полей, качественное поле на энергии инжекции (на уровне 0,6 Т).

Использование клиновидной обмотки в сочетании с железом позволяет простыми средствами получить поле в зазоре 6 Т, благодаря низкому уровню поля на сверхпроводящих обмотках (не более 4.5 Т) и невысокой величине сил действующих на обмотки. Первые испытания магнита проводились в специальном испытательном криостате погружного типа. Уже при первом подъёме тока было достигнуто значение магнитного поля $B = 6.25$ Т. После двадцати циклов тренировки максимальное поле в зазоре составило 6.74 Т.

После силовых испытаний двух прототипов магнитов было начато изготовление первых образцов реальных магнитов, на которых до конца 1990 года намечено провести подробные магнитные измерения для оценки качества этих магнитов с ускорительной точки зрения. В случае получения успешных результатов планируется к концу 1991 г. изготовить комплекты сверхпроводящих магнитов для двух накопителей «Сибирь-СМ». Остальные элементы накопителей (ВЧ-резонатор, квадрупольные линзы и т. д.) выполняются теплыми, часть элементов уже готовы, часть находится в стадии изготовления. Работы по запуску накопителя «Сибирь-СМ» предполагаются в 1992 г.

Конструкция сверхпроводящих магнитов с плоско-параллельными краями позволяет использовать их для создания накопителей на большую энергию. Если из восьми магнитов получается компактный накопитель на энергию 600 МэВ для субмикронной рентгенолитографии в производстве микроэлектроники, то из двенадцати магнитов получается накопитель на энергию 900 МэВ для рентгенолитографии в производстве элементов микромеханики [22], а из двадцати четырёх магнитов - накопитель на энергию 1,8 ГэВ для ангиографии.

В качестве инжекторов в компактные накопители - источники СИ для технологических целей в ИЯФ СО АН СССР создаются:

- малогабаритный электронный синхротрон на энергию 200 МэВ [23],
- сверхпроводящий линейный ускоритель на энергию 50 МэВ [24].

Малогабаритный синхротрон представляет собой компактную установку с габаритными размерами $2 \times 2 \text{ м}^2$ и общим весом ~ 3 т. Магнитная система синхротрона состоит из четырёх 90° -ных магнитов с однородным полем величиной 1,5 т и четырёх независимо питаемых квадрупольей, прямолинейные промежутки между магнитами составляют по 0,6 м., периметр синхротрона 5,1 м., апертура магнитов по горизонтали и вертикали 2 см.

Питание магнитов осуществляется импульсным током, экспоненциально нарастающим во времени с постоянной времени ~ 0,5 мсек. Вакуумная камера выполняется из тонкой нержавеющей стали

толщиной 0,2 - 0,3 мм. и при выбранном законе роста магнитного поля практически не искажает топографию магнитного поля в апертуре.

Энергоёмкость конденсаторной батареи для питания импульсных магнитов ~10 Кдж, при частоте повторения 1 гц средняя мощность ~ 10 Квт. Время ускорения ~ 1,5 мсек.

Ускоряющий ВЧ-резонатор питается от усилителя мощности, обеспечивающего импульсную мощность ~30 Квт.

Инжектором в синхротрон служит малогабаритный микротрон на энергию 8 МэВ, расположенный непосредственно над синхротроном в его центре.

Применение сверхпроводящих магнитов в накопителе «Сибирь-СМ», наличие на установке криогенного оборудования делают естественным использование и другого варианта сверхпроводящего инжектора. Параметры разрабатываемого в ИЯФ СО АН СССР сверхпроводящего импульсного линейного ускорителя [24] приведены в табл. 9.

Ускоряющей структурой линейного ускорителя является круглый диафрагмированный волновод. Структура работает в режиме бегущей волны с рециркуляцией электромагнитной волны. Ускоряющая структура изготавливается из ниобия. Ускоритель состоит из двух секций, каждая длиной 1 метр. Полные габариты ускорителя, включая инжектор, группирователь и криостат - четыре метра. Ускоритель питается от клистрона, развивающего мощность 5 Мвт с анодным напряжением 50 кВ.

VII. ПРОЕКТЫ НОВЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ - ИСТОЧНИКОВ СИ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ В СССР

Третье поколение специализированных источников рентгеновского синхротронного излучения, создаваемое сейчас в Европе, США и Японии (ESRF, APS, Spring) позволит иметь пучки рентгеновского ондуляторного излучения, спектральная яркость которых ограничивается только дифракционными эффектами.

Институтом ядерной физики СО АН СССР (Новосибирск) и Объединённым институтом ядерных исследований (Дубна) предложен проект аналогичного накопителя с условным названием «Сибирь-3» на энергию 10 ГэВ. Параметры накопителя приведены в табл. 10, схема показана на рис. 10.

Кроме генерации пучков синхротронного и ондуляторного излучения этот проект предусматривает реализацию дополнительных

возможностей, появляющихся за счёт повышения энергии до 10 ГэВ [27]:

а) Генерация фотонов (поляризованных) с рекордной интенсивностью и яркостью в широком спектральном интервале:

- от 100 эВ до 100 КэВ с помощью ондуляторов;
- от 100 КэВ до 3 МэВ с помощью сверхпроводящих вигглеров;
- от 3 МэВ до 30 МэВ с помощью обратного комптоновского рассеяния на далёких инфракрасных лазерных внутрирезонаторных фотонах (без выбывания электронов из пучка);
- от 30 МэВ до 3 ГэВ с помощью обратного комптоновского рассеяния на лазерных фотонах с измерением энергии вторичных фотонов по энергии выбывающего электрона;
- от 3 ГэВ до 10 ГэВ с помощью обратного комптоновского рассеяния на фотонах зеркально отражённого ондуляторного излучения ($E = 5 - 50$ эВ) от предыдущего сгустка, с измерением энергии вторичных фотонов по энергии выбывающего электрона; особенно интересны пучки фотонов полной энергии, имеющие монохроматичность $\frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma} \sim 10^{-2}$ при использовании первичных фотонов ондуляторного излучения с $E \sim 50$ эВ.

б) Использование пучков гамма-квантов ($E_\gamma = 1,7 - 2$ МэВ) из сверхпроводящего вигглера для получения мощных импульсных потоков нейтронов с помощью фотоядерных реакций. При использовании в качестве мишени бериллия, имеющего самый низкий порог для фотоядерных реакций (1,66 МэВ), можно получать без использования замедлителей интенсивный импульсный поток нейтронов (диапазон энергий $10^3 - 10^5$ эВ, число нейтронов в импульсе $\sim 10^9$, частота повторения $\sim 2 \cdot 10^5$ гц, длительность импульса $\sim 10^{-9}$ сек). Для экспериментов с монохроматизацией по времени пролёта уже на базах ~ 10 м. при энергии нейтронов 100 КэВ можно получить энергетическое разрешение лучше 10^{-3} .

в) Генерация импульсных пучков медленных позитронов высокой яркости за счёт образования электрон-позитронных пар пучком гамма-квантов ($E_\gamma = 1,2 - 1,5$ МэВ) из сверхпроводящего вигглера. Сейчас на линейных ускорителях электронов лучшая достигнутая эффективность производства медленных позитронов составляет величину [28] $K \frac{e^-}{e^+ \text{slow}} \sim 10^{-6} \frac{e^- \text{slow}}{e (E_e \sim 200 \text{ МэВ})}$. Это

обеспечивает поток медленных позитронов $\sim 10^6$ в импульсе длительностью от 10 нсек. до 3 мсек. с частотой повторения 300 гц.

Использование пучков гамма-квантов синхротронного излучения позволит иметь эффективность производства медленных позитронов

$$K_\gamma \longrightarrow e^+ \text{slow} \sim 3 \cdot 10^{-5} \frac{e^+ \text{slow}}{\gamma (E_\gamma \sim 1,5 \text{ МэВ})}$$

При одной и той же мощности первичных пучков электронов и гамма-квантов (~ 10 квт) поток позитронов будет в 10^4 раз больше при использовании гамма-квантов синхротронного излучения. Соответственно в этом случае обеспечивается $\sim 10^7 e^+$ в импульсе длительностью 1 нсек. с частотой повторения $2 \cdot 10^5$ гц.

Предлагаемый проект накопителя «Сибирь-3» может открыть и другие очень интересные экспериментальные возможности [27]. Требуется заинтересованный поиск физиков, серьёзно решивших воспользоваться этими возможностями и поставить адекватные им задачи. Только при условии такой широкой поддержки физиков разных специальностей проект «Сибирь-3» может быть реализован в Объединённом институте ядерных исследований (Дубна).

Другой более дешёвый проект специализированного источника СИ третьего поколения - накопитель «Сибирь-4» предлагается сейчас для сооружения в Сибирском центре синхротронного излучения в Новосибирске. В основу проекта заложено использование сверхпроводящих поворотных магнитов с полем 6 т., аналогичных создаваемым для накопителя «Сибирь-СМ». Кроме того, предполагается, что энергия электронов будет $\sim 2,4$ ГэВ - максимально допустимая величина при использовании сверхпроводящих поворотных магнитов с полем 6 т. Это объясняется тем, что благодаря росту энергетического разброса в пучке ($\sigma_E \sim E^3$) уменьшается время жизни пучка электронов, т.к. хвосты гауссовского распределения по энергии попадают за предельно допустимую величину $(\frac{\sigma_E}{E})_{\text{max}}$, определяемую либо размером ВЧ сепаратрисы, либо динамической апертурой. Обычно $(\frac{\sigma_E}{E})_{\text{max}} = (2,5 - 1) \cdot 10^{-2}$. Нетрудно показать, что

$$E_{\text{ГэВ}} \text{ Вт} < 10^5 \left(\frac{\sigma_E}{E} \right)_{\text{max}}^2$$

Поэтому принимая $B = 6$ т. и $\frac{\sigma_E}{E} \sim 1,5\%$ получим $E \sim 2,5$ ГэВ.

Магнитная структура накопителя «Сибирь-4» выбрана симметричной относительно центра поворотных магнитов, что обеспечивает минимум бетатронных функций внутри магнитов и существенно меньший эмиттанс электронного пучка по сравнению со структурами, состоящими из ахроматических поворотов. Предполагается, в

основном, использовать излучение только из поворотных магнитов возможно будет только два длинных промежутка для ондуляторов.

Основные параметры накопителя «Сибирь-4» приведены в табл. 11, схема накопителя показана на рис. 11. Такого типа накопитель может быть использован и как массовый источник СИ для ангиографии. В этом случае, следуя за названием проекта японского источника СИ «Spring-8», накопитель для ангиографии можно будет назвать «Summer-2.4» (Superconducting Universal Medical Middle Energy Ring).

Список литературы:

1. Г. Н. Кулипанов, А. Н. Скринский. Использование синхротронного излучения: Состояние и перспективы // УФН. -1977. -Т. 122, вып. 3. -С. 369-418.
2. Siberian SR Centre: brief description of SR experimental stations.-Novosibirsk,1990.-55 p.-(Preprint INP; N 90-90).
3. Proc.of the 7th USSR Nat.conf. on SR utilization:SR 86 // NIM.-1987.-V. A261,N 1/2.-P. 1-338.
4. Proc.of the 8th USSR Nat.conf.on SR utilization :SR 88 // NIM.-1989.-V. A282,N 2/3.-P. 369-768.
5. Г. Я. Кезерашвили, А. П. Лысенко, В. М. Хорев и др. Спиральный ондулятор на ВЭПП-2М для измерения радиационной поляризации встречных пучков // Тр. Всесоюз. совещ. по использованию синхротронного излучения:СИ-82. -Новосибирск, 1982. -С. 109-115.
6. В. В. Анашин, Г. Я. Кезерашвили, А. П. Лысенко и др. Сверхпроводящий спиральный ондулятор для измерения радиационной поляризации встречных пучков на ВЭПП-2М. -Новосибирск, 1984. -15 с. -(Препринт ИЯФ СО АН СССР;N 84-111).
7. В. В. Анашин, И. Б. Вассерман, А. М. Власов и др. Сверхпроводящая змейка с полем 75 Кгс для электрон-позитронного накопителя ВЭПП-2М. -Новосибирск, 1984. -(Препринт ИЯФ СО АН СССР;N 84-123).
8. A.S.Artamonov,L.M.Barkov,V.N.Baryshev et al. First results on

the work with a superconducting «snake» at the VEPP-3 storage ring // NIM.-1980.-V. 177,N 1.-P. 239-246.

9. Н. А. Винокуров, А. Н. Скринский Генераторный клистрон оптического диапазона на ультрарелятивистских электронах. -Новосибирск, 1977. -10 с. -(Препринт ИЯФ СО АН СССР;N 77-59).
10. N.A.Vinokurov,I.B.Drobyazko,G.N.Kulipanov et al. Lasing in visible and ultraviolet regions in optical klystron installed on the VEPP-3 storage ring // Free-electron lasers II /Ed.by Y.Petroff.-Bellingham:SPIE,1989.-V. 1133.-P. 2-10.
11. N.G.Gavrilov,G.N.Kulipanov,V.N.Litvinenko et al. Observation of mutual coherency of spontaneous radiation from two undulators separated by achromatic bend.-Novosibirsk,1990.-(Preprint INP; N 90-13).
12. S.G.Popov. Physics and technology of superthin internal target in storage ring // Proc. Topical conf.on Electronuclear physics with Internal Target,1989,SLAC.-Singapore et al.:World sci.,1990.-P. 37-47.
13. G.L.Kezerashvili. Photonuclear physics experiments with the use of gamma quanta beams obtained using backward Compton scattering technique.-Novosibirsk,1990.-(Preprint INP;N 262-90).
14. V.V. Anashin et al. Project of Siberia-1 - dedicated SR source.-Novosibirsk,1982.-(Preprint INP;N 82-116).
15. V.V.Anashin, A.G.Valentinov,V.G.Veshcherevich et al. The dedicated synchrotron radiation source «Siberia-2» // NIM.-1989.-V. A282,N 2/3.-P. 369-374.
16. V.N.Korchuganov,G.N.Kulipanov,N.A.Mezentsev et al. Optimization of parameters of the dedicated synchrotron radiation source for technology // NIM.-1983.-V. A208,N 1/3.-P. 11-18.
17. Н. А. Винокуров, Е. А. Переведенцев и др. Эффект отрицательной массы для нелинейной колебательной системы и его влияние на устойчивость когерентных бетатронных колебаний. -Новосибирск, 1976. -

9 с. -(Препринт ИЯФ СО АН СССР; N 76-88).

18. Н. А. Винокуров, В. Н. Корчуганов, Г. Н. Кулипанов и др. Влияние хроматичности и кубической нелинейности на кинематику бетатронных колебаний. -Новосибирск, 1976. -10 с. -(Препринт ИЯФ СО АН СССР; N 76-87).

19. А. Г. Валентинов, П. Д. Воблый, С. Ф. Михайлов и др. Магнитная система накопителя «Сибирь-2» - специализированного источника СИ. -Новосибирск, 1989. -30 с. -(Препринт ИЯФ СО АН СССР; N 89-174).

20. V.V.Anashin et al. Damping ring for electrons and positron BEP.-Novosibirsk, 1984.-27 p.-(Preprint INP; N 84-114).

21. V.V.Anashin, V.S.Arbusov, G.A, Blinov et al. Project of compact superconducting storage ring «Siberia-SM» // NIM.-1989.-V. A282, N 2/3.- P. 386-389.

22. W.Ehrfeld, P.Bley, R.Gotz et al. Fabrication of microstructures using LIGA process // J. Vac.Sci. Technol.-1988.-V. B6, N 1.-P. 178-182.

23. И. И. Авербух, Т. А. Всеволожская, Г. С. Виллевалльд и др. Компактный электронный синхротрон - инжектор накопителей - источников СИ для технологических целей. -Новосибирск 1990. -(Препринт ИЯФ СО АН СССР; N 90-116).

24. С. И. Бибко, В. Г. Вещеревич, В. Н. Волков и др. * Сверхпроводящий линейный ускоритель электронов на энергию 50 МэВ. - Новосибирск, 1990. -(Препринт ИЯФ СО АН СССР; N 90-117).

25. G.A.Kornyukhin, G.N.Kulipanov, V.N.Litvinenko et al. The magnetic system of an optical klystron using SmCo permanent magnets // NIM.-1983.-V. A208, N 1/3.-P. 189-193.

26. N.A.Vinokurov. Insertion device development at Novosibirsk // NIM.-1986.-V. A246, N 1/3.-P. 105-118.

27. G.N.Kulipanov. New possibilities and some construction problems of low emittance rings at an energy of 8-10 GeV:invited:

(Abstract) // RSI.-1989.-V. 60, N 7, pt 2.-P. 1406.

28. J.Dahm, R.Ley, K.D.Niebling. Electro-produced slow positron // Antimatter's 87:Proc.of symposium.-Baltzer, 1988.-P. 151-166.

History of X-ray sources

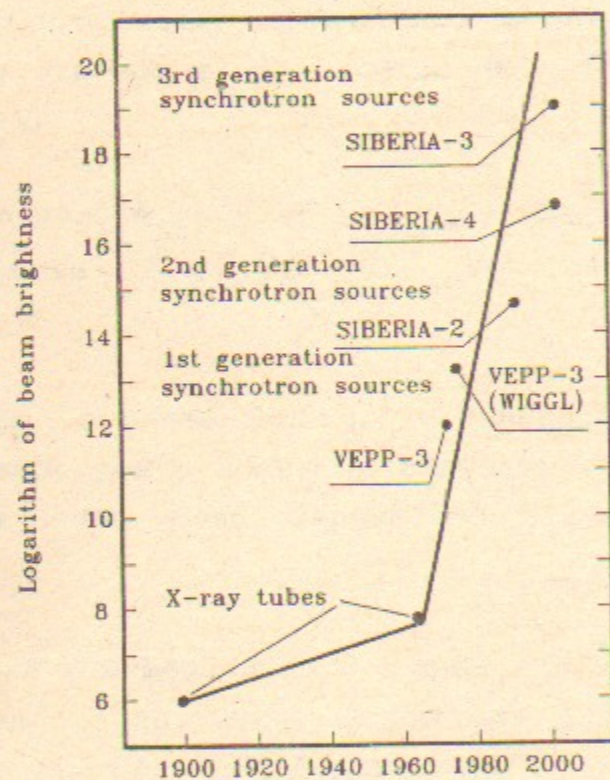
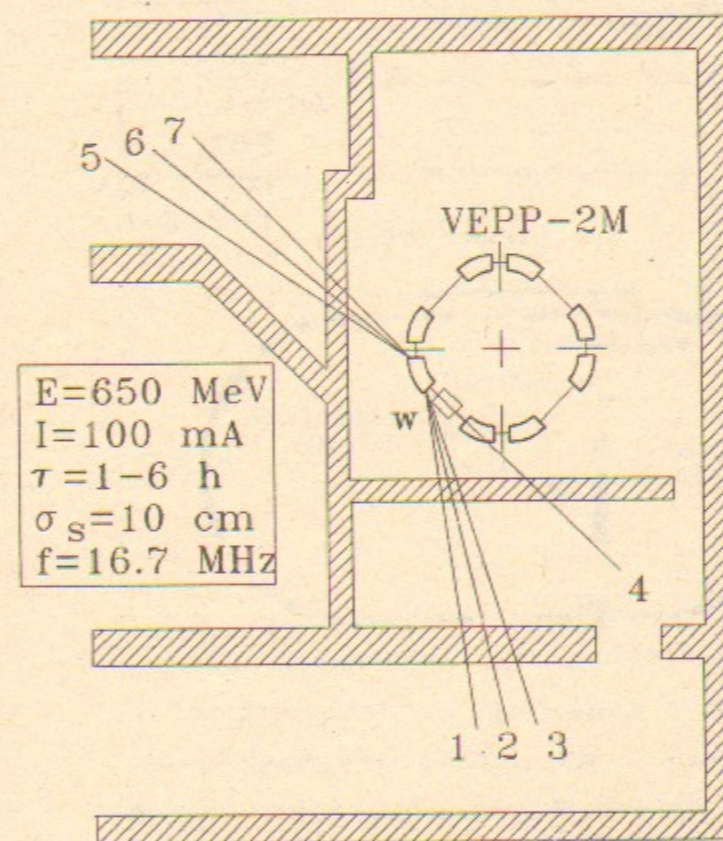


Рис. 1

Спектральная яркость существующих, создаваемых и планируемых рентгеновских источников.

VEPP - 2M



E=650 MeV
I=100 mA
 $\tau=1-6$ h
 $\sigma_s=10$ cm
f=16.7 MHz

1. X-ray lithography
2. SXR-spectroscopy
3. UV-time resolved spectroscopy
4. VUV-spectroscopy
5. SXR-microscopy
- 6,7. X-ray lithography

Рис. 2

Размещение экспериментальных станций на пучках синхротронного излучения накопителя ВЭПП-2М.

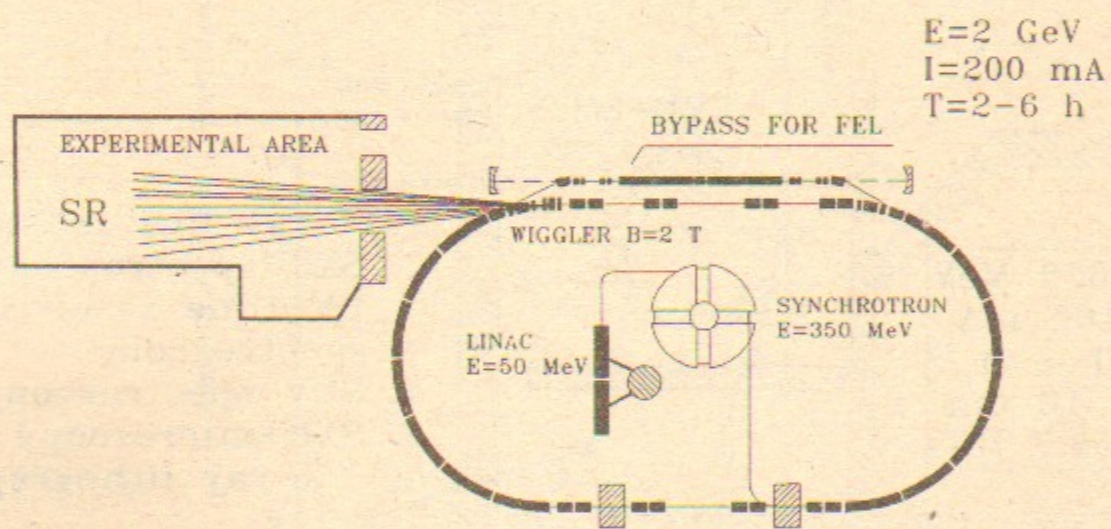


Рис. 3^а

Схема накопителя ВЭПП-3

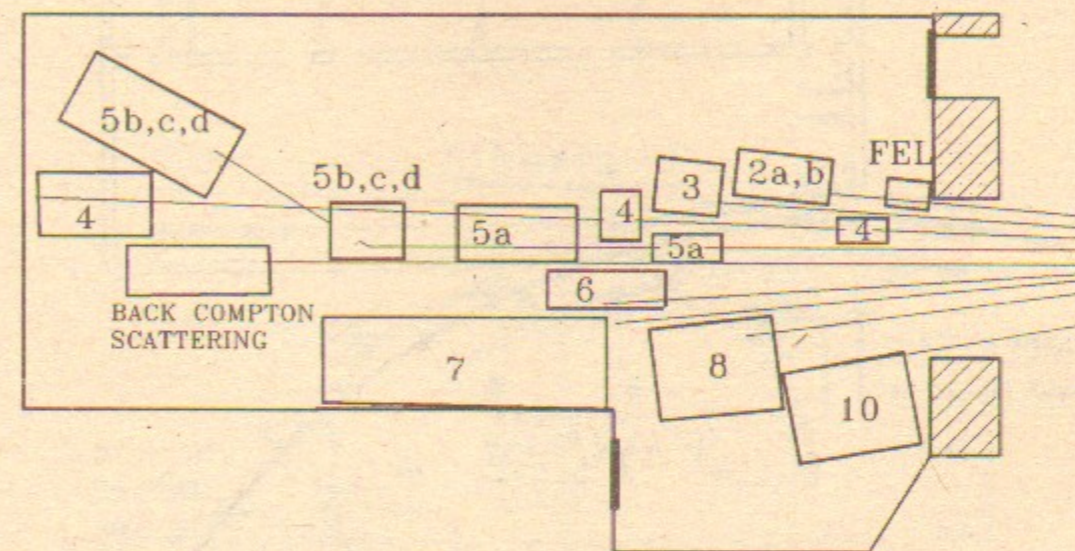


Рис. 3^б

Размещение экспериментальных станций на пучках синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3: 2a - Лауэ-дифрактометрия; 2b - аномальное рассеяние; 3 - рентгенофлуоресцентный анализ; 4 - ангиография; 5b - рентгеновская дифрактометрия с временным разрешением; 5c - рентгеноструктурный анализ белков; 5d - малоугловая дифрактометрия; 6 - рентгенолюминесценция с временным разрешением; 7 - рентгеновская топография; 8 - EXAFS - спектроскопия; 10 - рентгеновская литография.

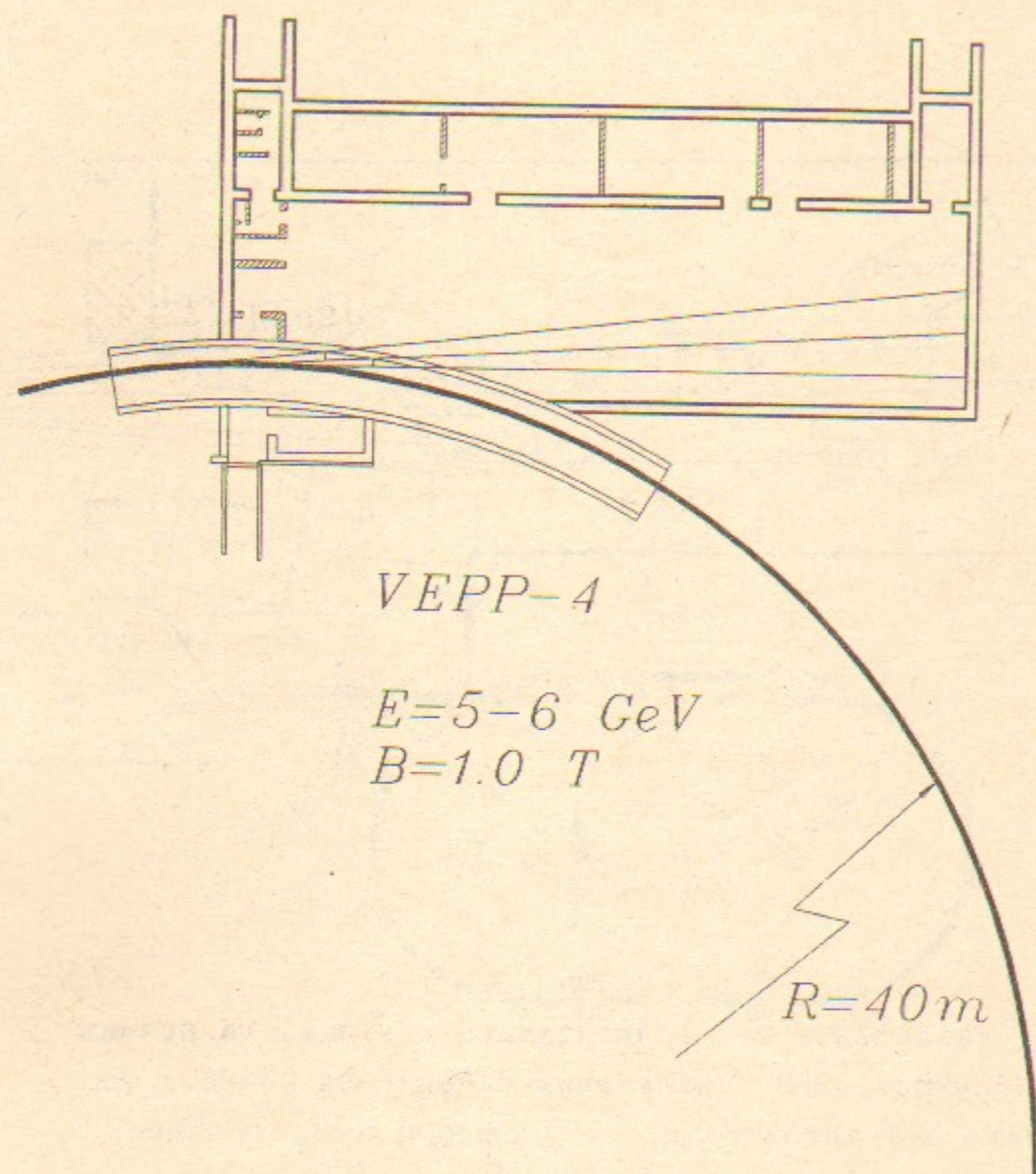


Рис. 4.

Размещение нового экспериментального зала для работы с синхротронным излучением на накопителе ВЭПП-4.

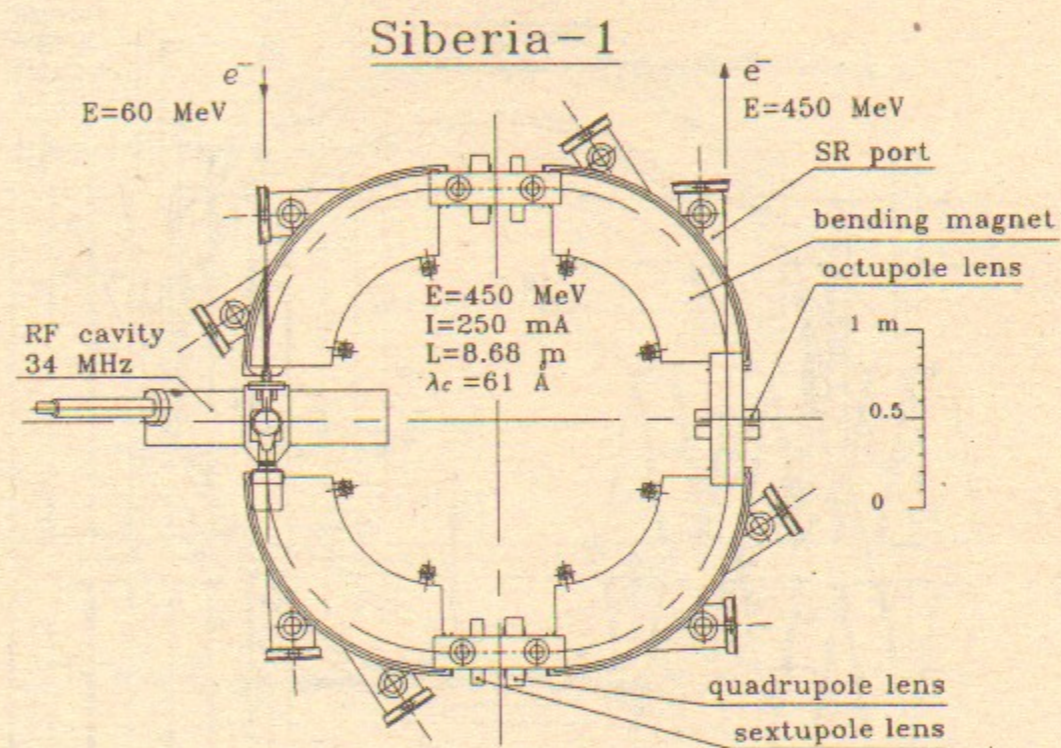


Рис. 5.

Схема накопителя «Сибирь-1»

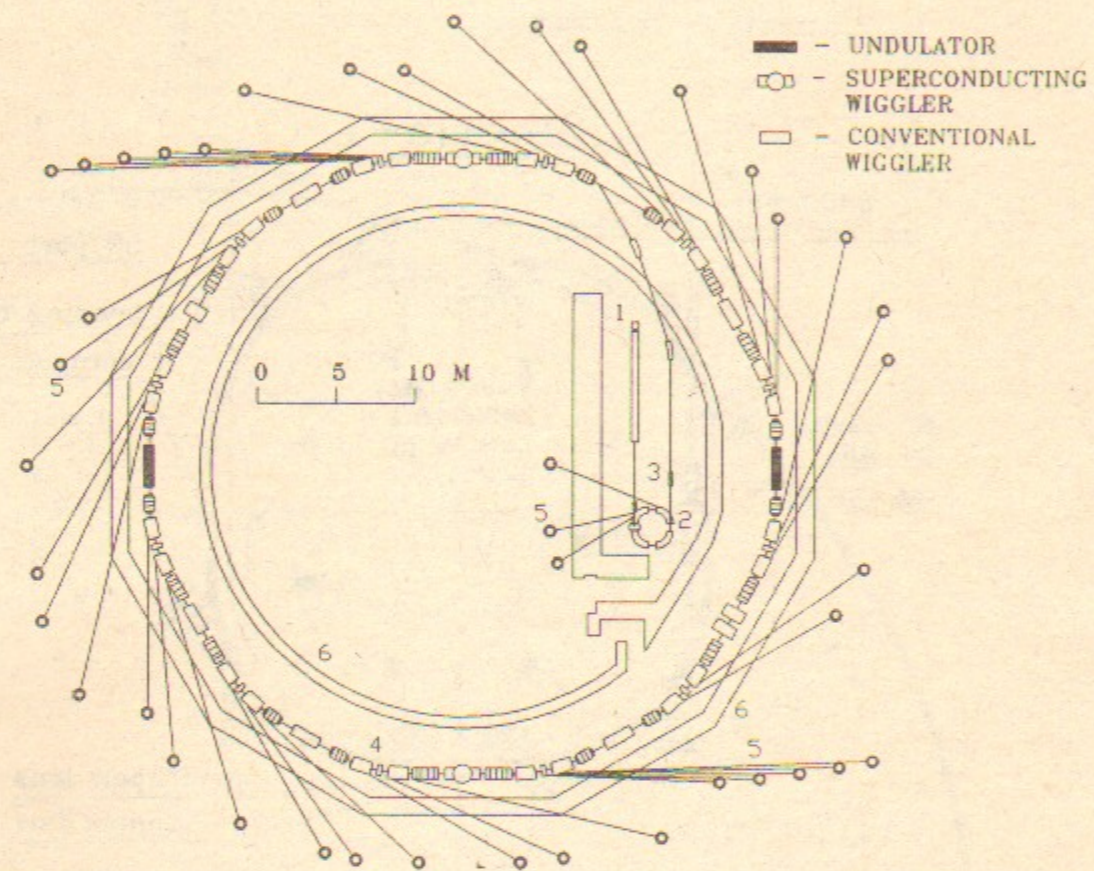
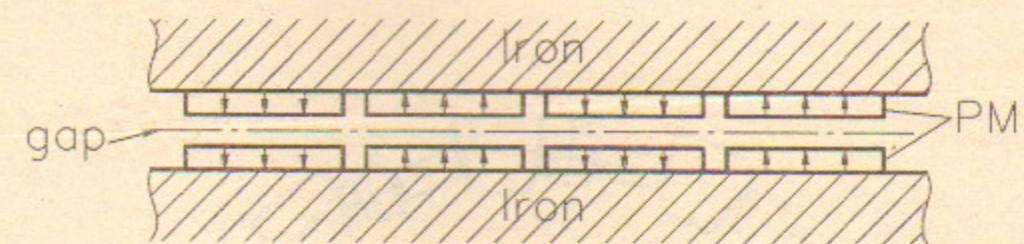
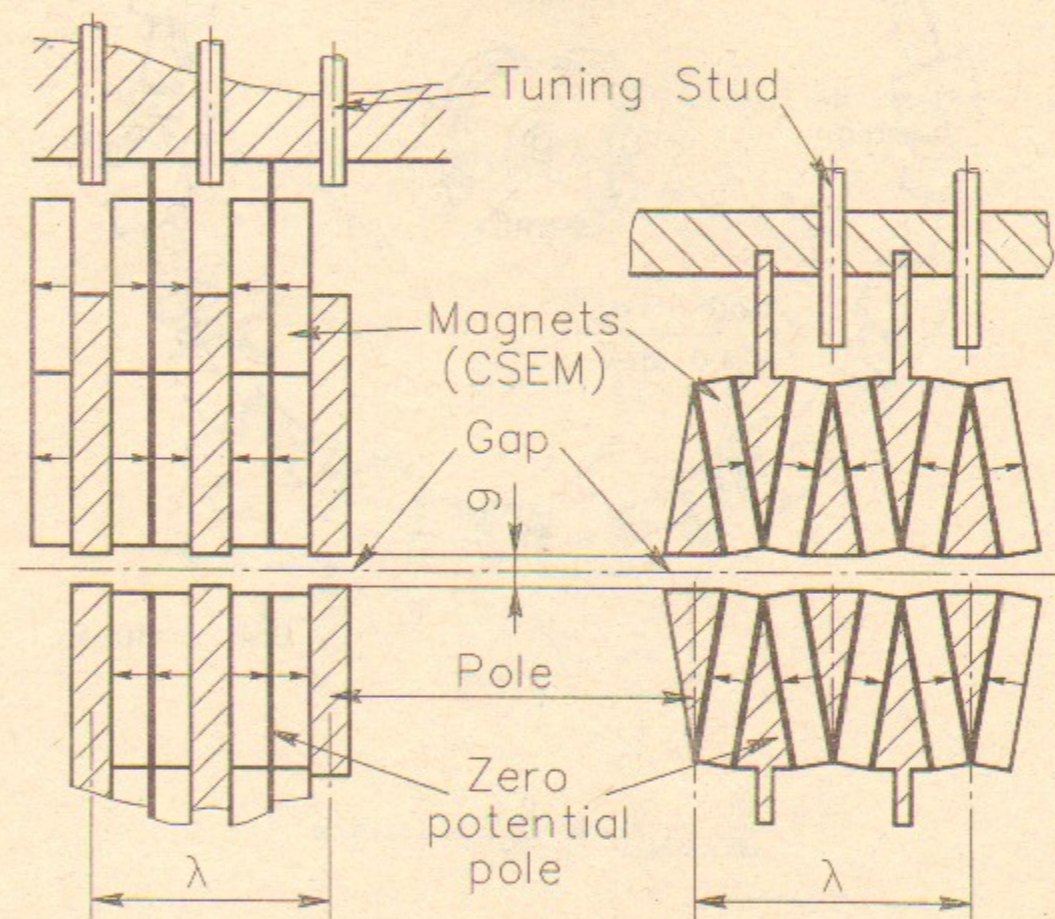


Рис. 6.
Схема размещения комплекса установок
накопителя «Сибирь-2»



a) OK-1
undulator



b) OK-2
undulator

c) OK-3
undulator

Рис. 7.
Схема ондуляторов ОК-1, ОК-2 и ОК-3, созданных в ИЯФ СО АН СССР
для работы с оптическим клистроном.

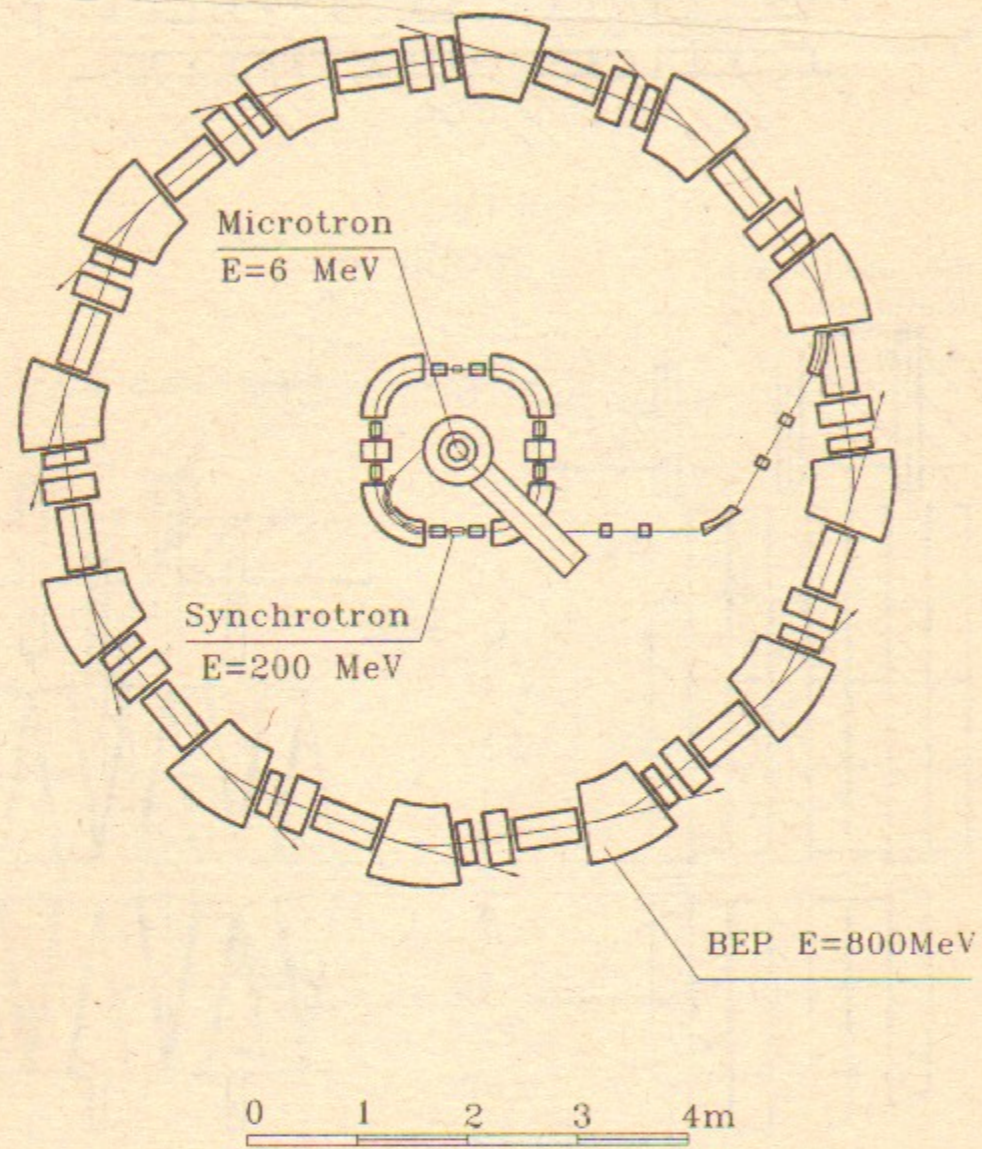


Рис. 8.
Схема накопителя БЭП с возможным размещением
инжектора

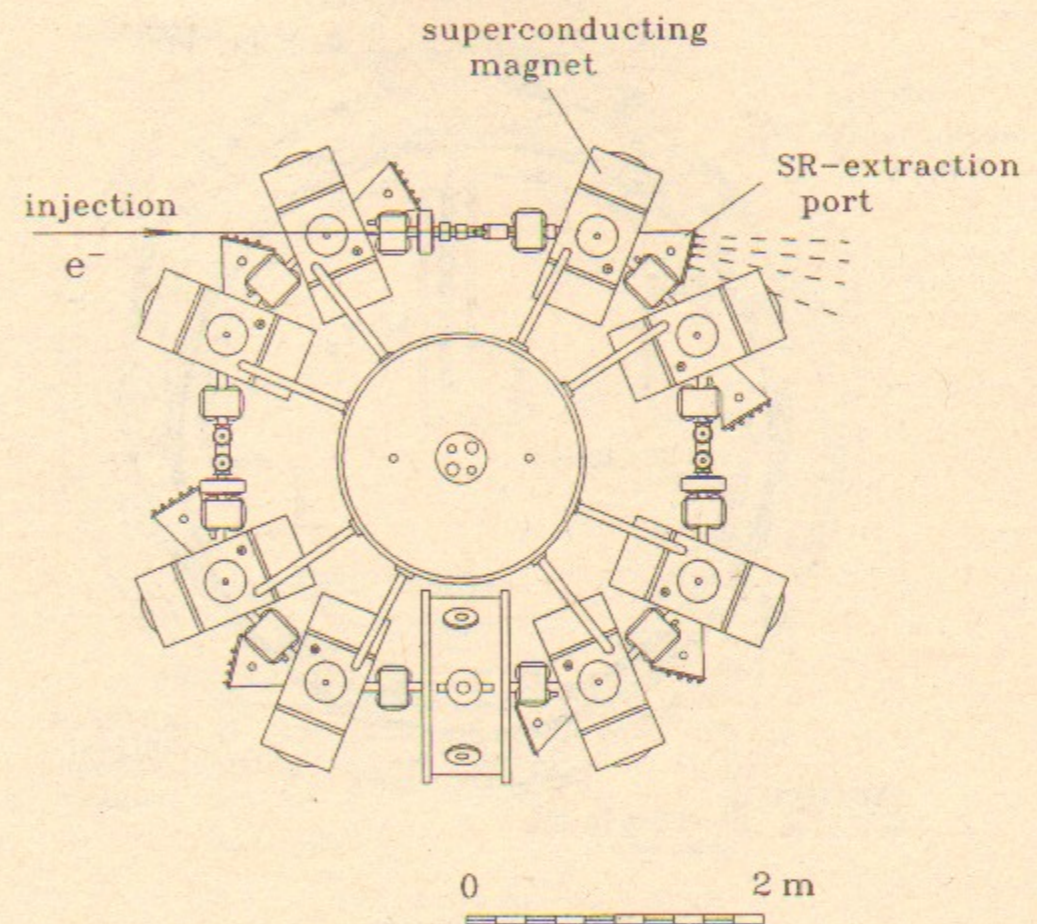


Рис. 9.
Схема компактного сверхпроводящего
накопителя «Сибирь-СМ»

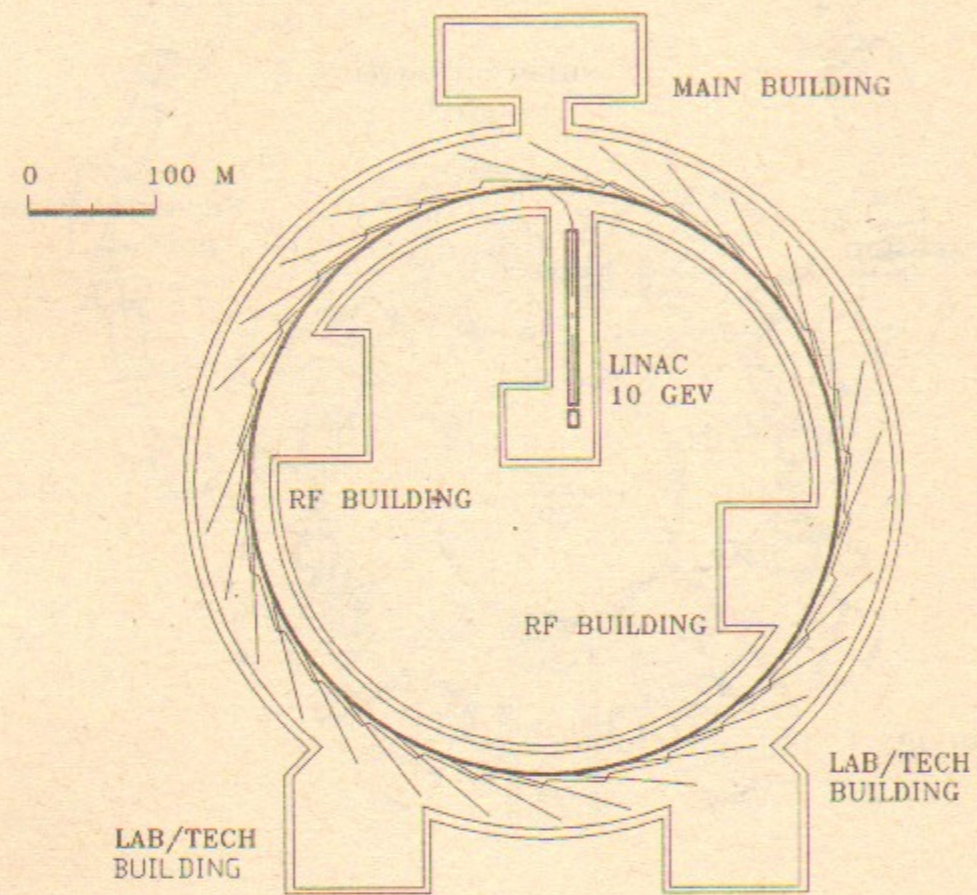


Рис. 10.

Схема предлагаемого проекта источника СИ на базе накопителя «Сибирь-3» с энергией 10 ГэВ.

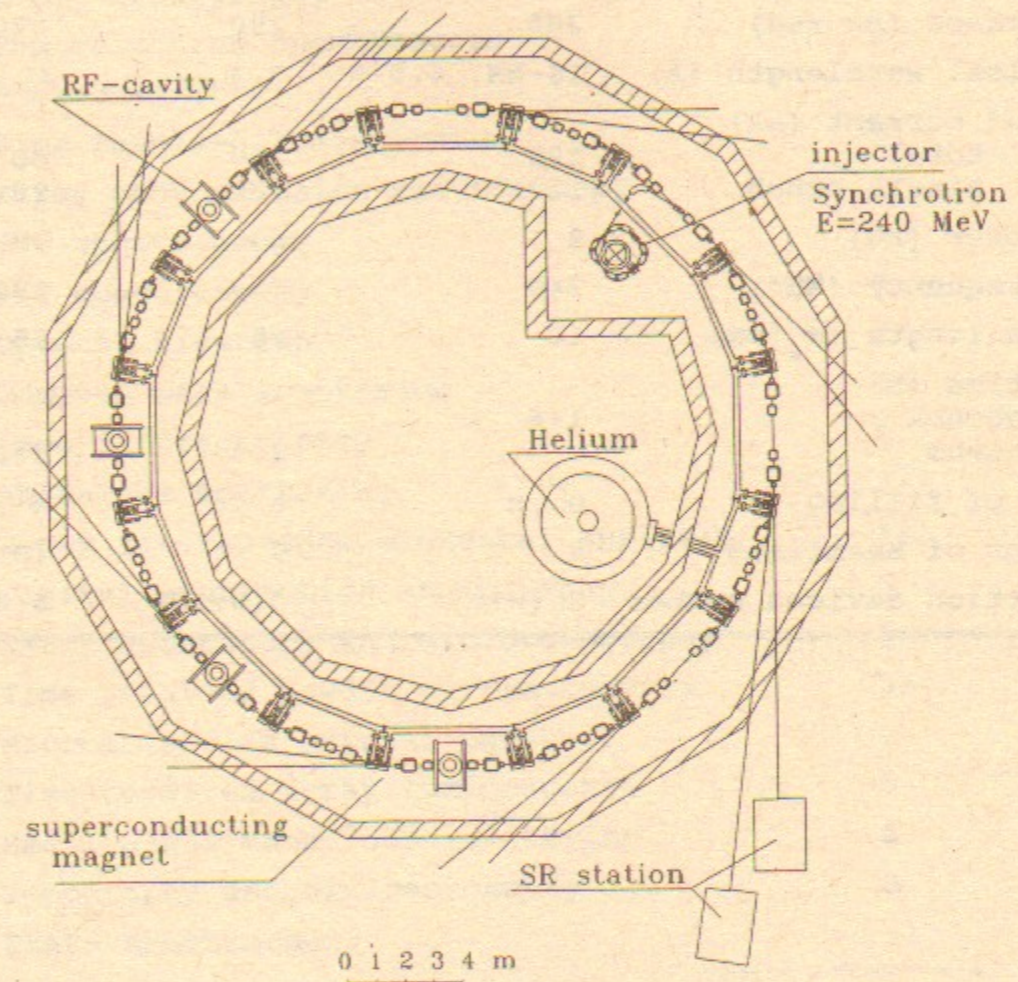


Рис. 11.

Схема проекта источника СИ на базе сверхпроводящего накопителя «Сибирь-4» с энергией 2,4 ГэВ.

Таблица 1. Основные параметры ВЭПП-2М, ВЭПП-3 и ВЭПП-4

Name	VEPP-2M	VEPP-3	VEPP-4
Status	operates	operates	reconstr.
Energy (GeV)	0.7	2.0	6.0
Emittance (nm·rad)	205	290	270
Critical wavelength (Å)	18-BM, 4.5-W	2.3	0.3
Stored current (mA)			
total	120	250	60
single bunch	120	220	20
SR power (kW)	2	60	78
RF frequency (MHz)	240	72	181
Bunch length $2\sigma_s$ (cm)	10	25	15
Lifetime (h)			
touchek	1+6		
vacuum		2+6	6+20
Type of filling	e^-, e^+	e^-, e^+	e^-, e^+
Number of beamlines	9	9	19
Insertion devices number	2 (W+U)	3 (W+2U)	6 (4W+2U)

Таблица 2. Перечень экспериментальных станций Сибирского центра синхротронного излучения

	Number of groups
X-ray lithography	4
X-ray lithography	1
Photoelectron spectroscopy	2
Photochemistry	2
Time resolved luminescence	5
X-ray photoemission spectroscopy	1
VUV spectroscopy	6
SXR spectroscopy	5
Optical klystron	2
Compton back scattering	4
Laue diffractometry	1
Anomalous scattering	4
X-ray fluorescence elemental analysis	14
Digital subtraction angiography	3
X-ray microscopy and microtomography	3
Time resolved powder diffractometry	31
Macromolecular crystallography	2
Time resolved X-ray luminescence	5
Small angle anomalous scattering	2
Topography and diffractometry	8
EXAFS spectroscopy	31
Total 139 gr.	

Таблица 3. Параметры специализированных источников СИ
«Сибирь-1», «Зеленоград» и «Сибирь-2»

Name	Siberia-1	Zelenograd	Siberia-2
Status	Operates	Conctr.-1991	Constr.-1991
Energy (GeV)	0.45	1.5	2.5
Emittance (nm·rad)	880	27	78
Critical wavelength (Å)	61-BM, 21-W	8-BM	1.75-BM
Stored current (mA)			
total	360	300	300
single bunch	360	100	100
SR power (kW)	4	~30	200
RF frequency (MHz)	34.5	181.3	181.4
Bunch length $2\sigma_s$ (cm)	60	4	4
Lifetime (h)			
touchek	5	10	10
vacuum			
Type of filling	e^-	e^-	e^-
Number of beamlines	7	39	39
Insertion devices			
number	1(W)	2(SCW) 5(W) 2(V)	7(2W+5U) 2(SCW)

Таблица 4. Параметры ондуляторов и вигглеров, созданных для
«Зеленограда» и «Сибири-2».

Parameters	W1 (SCW)	W2 (SCW)	W3 (SCW)	W4 (Li+h)	W5 (Ph.C)	W6 (REC)	W7 (SCW)
Period (cm)	~45	~40	11	24	20	5	10
Total length (cm)	~100	80	130	110+210	180	~260	~260
Number of periods	1	1	12	4-8	8	50	25
Field amplitude (T)	10	8	≤0.65	1	0.15	0.4	3
Min. gap (cm)	4	3.5	3.2	3.2	3.2	2.5	2.5
Wavelength (Å)							
-critical	0.3	~1		8.3			≤1
-fundamental			100+1500		800	10+40	

Таблица 5. Параметры сверхпроводящих вигглеров и ондуляторов,
созданных в Институте ядерной физики СО АН СССР.

	year	E GeV	H _{max} kGs	λ_{c} Å	\bar{P} kW	λ_0 cm	N _p	L cm
Wiggler (VEPP-3)	1979	2.1	34	1.3	1	9	20	90
Undulator (VEPP-2M)	1984	0.65	4.7	63	-	2.4	16	25
Wiggler (VEPP-2M)	1984	0.65	80	6	0.6	-	5	60
Wiggler (Siberia-1)	1985	0.45	58	21	0.07	-	3	35

Таблица 6. Параметры ондуляторов, созданных в ИЯФ СО АН
СССР для работы с ОК

	OK-1	OK-2	OK-3
	SmCo	SmCo	SmCo
Period (cm)	10	6.5	6.9
Total length (cm)	30	30	80
Number of periods	3	4.5	11
Field amplitude (kGs)	3	7	6.4
Gap (cm)	1.1	1.1	1.3
Length of OK (m)	1.1	1.1	2.0
Wavelength (μm)	.63	.63	.63
Years	1979- -1980	1981- -1982	1984- -1985

Таблица 7. Параметры электромагнитных ондуляторов и вигглеров, созданных в ИЯФ СО АН СССР.

	Year	E GeV	B _{max} kGs	λ Å	λ _u cm	g cm	N _u	L _u cm
Helical undulator VEPP-2M	1980	0.7	2.1	100	2.5	1.8	10	25
Wiggler VEPP-4	1985	5.5	16	0.4	22	2.2	5	110
Wiggler VEPP-3	1986	2.0	22	2.1	15+30+15	3	3	70
Undulator OK VEPP-3	1987	0.34	5.6	2400 7200	10	2.2	68	680

Таблица 8. Параметры накопителей БЭП и «Сибирь-СМ».

Name	SIBERIA-SM	BEP
Status	constr.	comiss.
Energy (GeV)	0.6	0.8
Emittance (nm·rad)	85	41
Critical wavelength (Å)	8.6	13.6
Stored current (mA)		
total	300	760
single bunch		
SR power (kW)	10	29
RF frequency (MHz)	30	26.83
Bunch length 2σ _s (cm)	16	15
Lifetime (h)		
touchek	4	4
vacuum		
Type of filling	e ⁻	e ⁻
Number of beamlines	28	12
Insertion devices	no	no

Таблица 9. Параметры сверхпроводящего линейного ускорителя.

Energy (MeV)	50
Electron pulse current (mA)	20
Duration of pulse (ns)	20
Repetition frequency (Hz)	0.5
RF frequency (MHz)	2450
Acceleration gradient (MeV/m)	25
Liquid helium consumption (l/h)	3.5

Таблица 10. Расчётные параметры накопителя «Сибирь-3» - специализированного источника СИ третьего поколения

Name	Siberia-3
Energy	10 GeV
Circumference	1452 m
Horizontal emittance	6·10 ⁻⁹ m·rad
Magnetic field strength	7 kGs
Number of cells	10
Number of straight sections	30
Number of insertion devices	27
Critical energy from BM	46.6 Kev
Energy loss per turn	18.7 Mev
Positron current	100 mA
Number of bunches	10+100
Bunch length	1 cm
RF power	2+3 MW

Таблица 11. Расчётные параметры
сверхпроводящего накопителя
«Сибирь-4»

Name	Siberia-4
Energy (GeV)	2.4
Circumference (m)	73
Emittance (nm·rad)	21
Magnetic field strength (T)	6
Critical wavelength (Å)	0.55
Energy loss per turn (MeV)	2.03
Stored current (mA)	
total	300
single bunch	100
RF frequency (MHz)	180
Type of filling	e ⁻
Insertion devices	no

Г.Н.Кулипанов

ИСТОЧНИКИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И
РАЗРАБОТКА ВИГГЛЕРОВ И ОНДУЛЯТОРОВ
В ИЯФ СО АН СССР

Препринт
№ 90-135

Работа поступила - 29 ноября 1990 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати - 29.XI.1990 г.
Формат бумаги 60x90 I/I6 Объем 3,4 печ.л., 2,8 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ №135.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90