ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

На правах рукописи

ШКАРУБА Виталий Аркадьевич

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МНОГОПОЛЮСНЫЕ ВИГГЛЕРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор физико-математических наук

МЕЗЕНЦЕВ Николай Александрович

Новосибирск 2017

Введение5
Глава 1 Сверхпроводящие вставные устройства для
генерации синхротронного излучения 17
1.1 Классификация вставных устройств18
1.1.1 Шифтеры 19
1.1.2 Многополюсные вигглеры и ондуляторы
1.2 Состояние развития сверхпроводящих вставных устройств в мире 29
1.3 Постановка задачи
Глава 2 Особенности проектирования многополюсных
сверхпроводящих вставных устройств
2.1. Оптимизация основных параметров многополюсных вигглеров
2.2. Выбор сверхпроводящего провода 49
2.2.1 Свойства NbTi сверхпроводников 50
2.2.2 Свойства Nb ₃ Sn сверхпроводников53
2.2.3 Анализ возможности использования ВТСП сверхпроводника 56
2.3. Характеристики используемых NbTi/Cu сверхпроводящих проводов 59
Глава 3 Магнитная система многополюсных
сверхпроводящих вигглеров для генерации
синхротронного излучения61
3.1. Многополюсные вигглеры с экстремально высоким уровнем поля (7
– 7.5 Тл) и длинным периодом (140 – 200 мм)61
3.1.1. 17 – полюсный вигглер с полем 7 Тл и периодом 148 мм для
BESSY-II
3.1.1.1. Конструкция центрального полюса
3.1.1.2. Прототип многополюсного вигглера
3.1.1.3. Технология изготовления сверхпроводящих катушек
3.1.1.4. Защита обмоток при потере сверхпроводимости
3.1.2 21 – полюсный вигглер с полем 7.5 Тл и периодом 164 мм для
Курчатовского источника Сибирь-2 105

3.1.2.1. Особенность зануления интегралов поля в многополюсных	
вигглерах	. 110
3.1.2.2. Зануление интегралов поля в многополюсных вигглерах с	
помощью натянутой проволочки с током	. 117
3.1.3 15-полюсный 7.5 Тл вигглер для LSU-CAMD	. 123
3.2. Многополюсные вигглеры со средним уровнем поля (3.5 – 4.2 Тл) и	
небольшим периодом (48-60мм)	. 138
3.3. Многополюсные вигглеры с коротким периодом (30-34 мм) и низким	
уровнем поля (2 – 2.2 Тл)	. 151
3.3.1 63-полюсный 2 Тл вигглер для накопителя CLS	. 153
3.3.2 119-полюсный 2.1 Тл вигглер для накопителя ALBA-CELLS	. 155

Глава 4 Криогенная система многополюсных

сверхпроводящих вигглеров с нулевым расходом

жидкого гелия163
4.1. Вигглер для PLS
4.1.1. Теплоприток через оптимизированные медные токовводы 168
4.2. Вигглер для LSU-CAMD 172
4.2.1. Использование кевлара для подвески гелиевого сосуда 173
4.2.2 Криогенная суперизоляция для подавления излучения 175
4.3. Использование криокулеров для охлаждения тепловых экранов 177
4.3.1. Состояние рынка криокулеров в мире178
4.4. Использование криокулеров для реконденсации гелия
4.5. Использование керамических ВТСП сверхпроводящих токовводов 188
4.6. Исследование работы вигглера в режиме замороженного тока 197
4.6.1. Система подкачки тока
4.6.2. Прецизионная стабилизация поля с помощью датчиков ЯМР 201
4.6.3. Работа в режиме замороженного тока в многополюсном вигглере 209
4.6.4. Особенности использования режима замороженного тока 214
4.6.5. Использование системы механического разрыва токовводов
4.7. Перенос токовводов в защитный вакуум криостата

4.8. Концепция криостата с перехватом всех каналов притока тепла в
жидкий гелий
4.8.1. Блок токовводов
4.8.2. Уменьшение расхода гелия за счёт удвоения числа токовводов 239
4.9. Исследование эффективности теплообменника с позолоченной
поверхностью
4.10. Устранение влияния вибраций криокулеров на электронный пучок 250
4.11. Криостат вигглера с нулевым расходом жидкого гелия и
особенности его работы в режиме пониженного давления
Глава 5 Использование лайнера для защиты от нагрева
пучком
5.1. Источники нагрева лайнера
5.1.1. Нагрев камеры синхротронным излучением
5.1.2. Нагрев камеры токами изображения
5.1.2.1. Резистивный нагрев камеры от классического скин-эффекта 295
5.1.2.2. Вклад аномального скин-эффекта в резистивный нагрев
камеры
5.1.2.3. Учёт магниторезистивного эффекта в нагреве камеры
5.1.2.4. Влияние шероховатости на нагрев камеры 305
5.2. Выбор конфигурации вакуумной камеры для пучка
5.3. Использование медного лайнера на вигглере ELETTRA
5.4. Проблема механической устойчивости лайнера 326
Глава 6 Прогноз развития сверхпроводящих
многополюсных вставных устройств
Заключение
Благодарности
Приложение А
Литература

Введение

Актуальность работы: Синхротронное излучение (СИ), которое генерируется при прохождении пучка заряженных частиц через участок с магнитным полем, является одним из уникальных инструментов для исследования свойств вещества. В настоящее время в мире существует уже около 50 источников синхротронного излучения (как действующих, так и строящихся), которые обеспечивают проведение различных фундаментальных и прикладных исследований в самых различных областях знаний - физике, материаловедении, химии, катализе, биологии, археологии, геологии. Главная задача, стоящая при создании источников СИ – это улучшение их основной характеристики - спектральной яркости потока излучения – числа фотонов в единицу времени в данной спектральной полосе с единицы площади источника в единицу телесного угла. Именно спектральная яркость определяет величину полезного потока фотонов, который взаимодействует с изучаемым образцом, и, если яркость будет недостаточна, то это приведёт к ухудшению статистической точности измерений или вообще исключит возможность проведения эксперимента. Кроме того, в последнее время растёт число научных проблем, для исследования которых требуется более жёсткий спектр излучения, вплоть до 100 КэВ.

Решение задачи увеличения яркости источника, и особенно в жёсткой области спектра, можно добиваться одновременно несколькими способами. Во-первых, можно использовать ускорители с более высокой энергией пучка, поскольку угловая расходимость пучка синхротронного излучения уменьшается как $\theta_{SR} \sim 1/\gamma$ (где релятивистский фактор γ определяется как отношение полной энергии пучка E к энергии покоя E_0 электрона: $\gamma = E/E_0$) и, к тому же, средняя по спектру энергия квантов излучения возрастает квадратично с энергией пучка. Так же нужно иметь электронный пучок с малым эмиттансом, чтобы уменьшить размеры источника излучения и, тем самым, также повысить яркость, увеличив число излучаемых фотонов с единицы площади. Но дальнейшее улучшение этих параметров связано с коренной модернизацией всей структуры уже существующих ускорителей, что требует больших финансовых вложений. Во-вторых, можно увеличивать уровень магнитного поля в точке излучения, от которого характеристическая энергия квантов спектре излучения зависит линейно. Однако если говорить про В обычные поворотные магниты, то уровень поля в них ограничен величиной 2 Тл, что определяется характеристиками насыщения железа. Получение же более высокого уровня поля В поворотных магнитах связано уже с использованием сверхпроводящих технологий и, опять же требует коренной модернизации существующих укорителей. Поэтому гораздо более гибким и экономически эффективным способом является не вмешательство в уже существующую магнитную структуру накопителя, а использование так называемых, вставных устройств (от английского "insertion devices"), которые устанавливаются в свободные прямолинейные промежутки накопителей. Одним из видов вставных устройств являются сверхпроводящие шифтеры (от английского "shift" – сдвигать), которые предназначены для сдвигания спектра излучения в коротковолновую область. Шифтер представляет собой магнит, состоящий из одного центрального диполя (полюса) с сильным уровнем магнитного поля и боковых полюсов с низким полем, предназначенных для компенсации искажения орбиты, произведённого центральным полюсом. Однако наиболее эффективным было бы использование не трёх, а многополюсных вставных устройств со знакопеременным полем, в которых использовались бы сверхпроводящие технологии. В этом случае можно в коротковолновую область, одновременно как смещать спектр излучения увеличивая уровень магнитного поля за счёт использования сверхпроводимости, так и повышать яркость излучения, которая прямо пропорциональна числу магнитных полюсов. Такие многополюсные вставные устройства характеризуются параметром ондуляторности К, который определяется соотношением между максимальным углом поворота электронов в магнитном поле $\theta_e \sim K/\gamma$ и характерным углом расходимости излучения из каждой точки траектории электрона $\theta_{SR} \sim 1/\gamma$. Параметр ондуляторности К, с точки зрения магнитной структуры вставного устройства, пропорционален произведению $K = 0.934 \cdot B_0 \cdot \lambda_0$, где λ_0 [см] - период изменения и $B_0[Tл]$ - амплитуда магнитного поля. В зависимости от величины параметра ондуляторности многополюсные вставные устройства принято разделять на

вигглеры с $K \gg 1$ (от английского wiggle – «покачивание») и на ондуляторы с $K \sim 1$ (от французского ondulation – «колыхание»). Реально граница между этими двумя типами устройств весьма условна и определяется тем, что в вигглере конусы излучения из каждого отдельного полюса располагаются в пространстве в форме расходящегося веера, а у ондулятора, благодаря тому, что излучение формируется на длине сравнимой с периодом, эти конусы складываются в одном направлении и между ними наблюдается перераспределение мощности излучения на некоторых длинах волн в результате интерференции. Таким образом, спектр излучения из вигглера имеет непрерывную форму, а излучение из ондулятора является линейчатым и представляет собой набор гармоник. Причём у вигглеров с коротким периодом может наблюдаться одновременно как ондуляторный спектр в области малых энергий фотонов, так и непрерывный на больших энергиях.

Задача создания каждого такого сверхпроводящего многополюсного вставного устройства, требует, в отличие, например, от обычных сверхпроводящих для исследования различных образцов соленоидов, используемых в больших магнитных полях, специального ускорительного подхода, так как они устанавливаются на реально работающие очень дорогостоящие источники СИ и не должны оказывать какого-либо вредного воздействия, ухудшающего качество пучка. Для этого необходимо не просто достигнуть необходимого уровня магнитного поля с нужным уровнем однородности, но и решить так же в каждом конкретном случае весь комплекс чисто ускорительных задач, связанных с влиянием магнитной структуры вставного устройства на динамику пучка.

Кроме того, специфика сверхпроводящих устройств состоит в необходимости использования специальных криостатов для поддержания на сверхпроводящих обмотках криогенных температур. Основная проблема в эксплуатации большинства традиционных криостатов состоит в необходимости использования в качестве хладагента жидкого гелия. При этом при высоком уровне расхода жидкого гелия не возникают значительные экономические только затраты, но И сильно ограничивается удобство эксплуатации таких устройств, в связи с необходимостью постоянно восполнять потери жидкого гелия (зачастую, раз в несколько дней). Это становится особенно критичным для круглосуточно работающих источников СИ, так

как вставные устройства должны располагаться непосредственно в радиационной внутри биозащиты и доступ к ним для обслуживания обычно бывает очень зоне, затруднён. Поэтому решение задачи создания надёжных криостатов для сверхпроводящих вставных устройств с минимально возможным расходом жидкого гелия и обеспечения их автономной эксплуатации в течение очень длительного времени (например, около года) имеет принципиальное значение. Решением этой проблемы может стать правильное применение для охлаждения узлов криостата промышленно выпускаемых криокулеров различными температурнос мощностными характеристиками.

Использование многополюсных сверхпроводящих вставных устройств позволяет не только значительно расширить возможности экспериментов с использованием синхротронного излучения на современных накопителях, но так же может значительно продлить уже существующим жизнь давно источникам, характеристики излучения которых уже не отвечают современным требованиям. Поэтому практически для всех источников СИ в мире, как уже существующих, так автономно работающих И строящихся, задача создания надёжных И сверхпроводящих многополюсных вставных устройств, обладающими требуемыми характеристиками является не просто очень актуальной, а имеет принципиальное значение.

Цель работы: Исследовать научные, технические и технологические аспекты, позволяющие решить комплексную задачу создания надёжных сверхпроводящих многополюсных вставных устройств (вигглеров), предназначенных для генерации синхротронного излучения в широком спектральном диапазоне при установке их на специализированные накопители - источники СИ. Данные устройства должны специфическим конкретного отвечать задачам каждого эксперимента И удовлетворять требованиям конкретного накопителя, не ухудшая его свойства с точки зрения динамики пучка. Данные устройства должны так же обладать возможностью непрерывной автономной работы в закрытой для обслуживания радиационной зоне ускорителей в течение длительного времени (не менее года) без восполнения жидких хладагентов.

Научная новизна:

1. Впервые предложена и реализована концепция криогенной системы для сверхпроводящего вставного устройства, работающего на накопителе заряженных частиц, основанная на последовательном перехвате всех каналов притока тепла на ступени криокулеров с соответствующими температурами, которая позволила, в отличие от существующих систем, не только снизить расход жидкого гелия до нуля, но и стабильно получать пониженное давление до 0.3 бар в гелиевом сосуде с холодной массой около 1000 кг, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку со стороны электронного пучка и вводимый ток для запитки магнита величиной около 1000 А.

2. Впервые предложена и реализована концепция защиты сверхпроводящего магнита, находящегося в гелиевом сосуде, от теплового воздействия со стороны электронного пучка с использованием лайнера - негерметичной медной камеры, которая в качестве отдельного конструктивного элемента вставляется внутрь гелиевой камеры и охлаждается ступенями криокулеров до температур ниже 10 К. Такая камера с температурой, близкой к температуре гелиевой камеры 4.2К, В отличие от традиционно используемых медных экранов, охлаждаемых жидким азотом, значительно уменьшает теплоприток в гелий через излучение и тепловые контакты. С другой стороны, отдельно охлаждаемый медный лайнер, имеющий высокую теплопроводность при низкой температуре, в отличие от также традиционно используемого гальванического медного покрытия, наносимого на 4 К гелиевую камеру, позволил отвести тепловую нагрузку от гелиевого сосуда со стороны электронного пучка и синхротронного излучения на ступени криокулеров.

3. Впервые предложено и реализовано техническое решение, позволяющее защитить медный лайнер от механических деформаций со стороны пондеромоторных сил, возникающих при резком уменьшении магнитного потока, пронизывающего стенки лайнера, при потере сверхпроводимости в магните. Идея состоит в одновременном уменьшении наводимых в лайнере токов за счёт использования меди с пониженной электропроводностью (RRR<50), изготовлении лайнера с минимальной толщиной стенок на грани технологического предела (0.5 мм), а также использовании специального пружинного элемента, возвращающего стенки лайнера в

первоначальное положение. Использование тонкой стенки позволяет одновременно минимизировать магнитный зазор для получения максимального уровня магнитного поля.

4. Впервые предложена и разработана универсальная методика для оптимизации параметров сверхпроводящих многополюсных вигглеров, позволяющая получать требуемые спектральные и мощностные характеристики синхротронного излучения на основе подбора величины периода и магнитного поля на орбите при определённом магнитном зазоре и одновременном достижении максимально возможного уровня магнитного поля на обмотке, близкого к току короткого образца. В магнитах, разработанных по этой методике, в большинстве случаев, был возможный уровень магнитного поля на орбите пучка, достигнут предельно максимальному току в обмотке на уровне 90-95% от тока соответствующий короткого образца, что для обмоток типа рейстрек, является рекордным значением.

5. Впервые предложена и реализована схема запитки сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров (в том числе и секционированных) с разделёнными токами, которая не только обеспечивает оптимальную запитку обмоток для достижения максимального уровня поля, но и позволяет настраивать интегралы магнитного поля для замыкания орбиты пучка без использования дополнительных источников тока.

6. Впервые предложена и реализована силовая схема бандажирования сверхпроводящих обмоток с использованием продольно расположенных бронзовых шпилек, которые при охлаждении магнита, создают дополнительное бандажирующее усилие за счёт разности коэффициентов теплового расширения материалов.

7. Впервые предложен и реализован метод повышения устойчивости обмоток к выходу из сверхпроводящего состояния, спровоцированного локальными сбросами электронного пучка накопителя при инжекции, состоящий в использовании в сверхпроводящих обмотках многополюсных вигглеров теплоёмких добавок в эпоксидный компаунд на основе гадолиния.

Положения, выносимые на защиту:

1. Создан новый класс вставных устройств – сверхпроводящие многополюсные вигглеры генерации синхротронного излучения. Было разработано ДЛЯ И реализовано более десятка уникальных сверхпроводящих вставных устройств с рекордными параметрами, как по величине магнитного поля, так и по минимальному потреблению жидкого гелия, не имеющих аналогов в мире. Спектральные характеристики излучения, генерируемого этими устройствами, перекрыли весь востребованный пользователями диапазон по энергиям квантов и успешно используются для решения исследовательских задач с помощью синхротронного излучения во многих крупнейших зарубежных и российских научных центрах: LSU-CAMD (CIIIA), BESSY-II (Германия), ELETTRA (Италия), CLS (Канада), DLS (Англия), LNLS (Бразилия), ALBA (Испания), AS (Австралия), ANKA (Германия) и КИСИ (Москва). Стало общепризнанным, что ИЯФ СО РАН занимает лидирующие позиции в создании сверхпроводящих многополюсных вигглеров;

2. Предложена и впервые реализована новая концепция конструирования криостатов для сверхпроводящих магнитов на основе криокулеров, позволившая повысить эффективность использования мощности холодильных ступеней до уровня, не только снижающего расход жидкого гелия до нуля, но и создающего пониженное относительно атмосферного давление в криогенном сосуде с соответствующим понижением температуры кипения жидкого гелия вплоть до ~3 К. Новый подход заключается в использовании холодильных ступеней криокулеров не только для реконденсации уже испарённого гелия, но И для полного предотвращения его испарения путём последовательного перехвата всех каналов притока тепла на ступени криокулеров с соответствующими температурами. Понижение рабочей температуры позволило также увеличить величину магнитного поля, благодаря сдвигу токовой характеристики сверхпроводящего провода и, тем самым, повысить надёжность. На основе этого принципа было создано семейство криогенных вставных устройств, способных долговременно (в течение нескольких лет) работать на ускорителях заряженных частиц в условиях автономно без потребления ограниченного доступа жидкого гелия, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку, создаваемую электронным пучком и вводимый

ток для запитки магнита величиной около 1000 А, что никем в мире ещё не было продемонстрировано;

3. Предложена и разработана универсальная методика оптимизации параметров вигглеров получения сверхпроводящих многополюсных ДЛЯ требуемых спектральных и мощностных характеристик синхротронного излучения на основе величины периода и магнитного поля на орбите при определённом подбора магнитном зазоре и одновременном достижении максимально возможного уровня магнитного поля на обмотке, определяемого техническим пределом – током короткого образца сверхпроводящего провода. Данная методика позволила оптимизировать каждое из вставных устройств под свою специфическую пользовательскую задачу с учётом конкретных особенностей данного накопителя и требований к спектру и мощности генерируемого излучения;

4. На большинстве из созданных многополюсных вигглеров был продемонстрирован реальный ток в обмотках величиной не менее, чем 90-95% от теоретического предела (тока короткого образца), что является рекордными параметрами для обмоток типа рейстрек и позволяет говорить о создании технологии стабильного изготовления сверхпроводящих вигглеров с большим количеством обмоток и предельно возможным уровнем магнитного поля на каждой из обмоток;

5. Обоснованы и продемонстрированы преимущества схемы расположения сверхпроводящего одиночных обмоток многополюсного вигглера В виде горизонтального рейстрека по сравнению с конструкцией типа вертикальный рейстрек для вигглеров с малым периодом и ондуляторов. В частности, показана экономическая целесообразность именно такой конструкции при необходимости замены отдельных неисправных обмоток, что особенно важно при массовом изготовлении вигглеров (например, при создании затухательных колец, используемых для уменьшения эмиттанса пучка);

6. Предложен и впервые создан конструктивный элемент криостата - медный лайнер, предназначенный для эффективной защиты жидкого гелия и сверхпроводящих обмоток от нагрева со стороны электронного пучка ускорителя и обладающий также устойчивостью к механическим деформациям, вызванным

электромагнитными силами при выходе магнита из сверхпроводящего состояния. Изучены особенности лайнеров различной конструкции и выявлены конструктивные ограничения, приводящие к возможным неисправностям в работе вигглера. Выработаны практические рекомендации, которые можно применять при конструировании лайнеров для различных вставных устройств;

7. Предложены и впервые реализованы схемы подключения обмоток многополюсных вигглеров (в том числе и секционированных) с разделёнными токами, которые не только обеспечивают оптимальную запитку обмоток для достижения максимального уровня поля, но и позволяют настраивать интегралы магнитного поля для замыкания орбиты пучка без использования дополнительных источников тока и, соответственно, не увеличивая теплоприток в гелий от дополнительных токовводов;

8. Предложено и реализовано использование теплоёмких добавок в эпоксидный основе гадолиния для повышения устойчивость обмоток компаунд на многополюсных вигглеров сверхпроводящего К выходу ИЗ состояния, спровоцированного локальными сбросами электронного пучка накопителя при инжекции;

9. Обоснованы и реализованы системы защиты сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров, основанные на цепочках холодных диодов и резисторов, надёжно защищающих обмотки от разрушения при выходе из сверхпроводящего состояния и обеспечивающие регистрацию перехода в нормально-проводящее состояние, исключающую ложные срабатывания.

Практическая ценность работы: Результатом диссертационной работы стало создание более десятка уникальных сверхпроводящих многополюсных вставных устройств для генерации синхротронного излучения, перекрывающих весь необходимый для экспериментаторов спектральный диапазон и позволяющих автономно работать в условиях ограниченного доступа не только без расхода жидкого гелия, но и с пониженным давлением в гелиевом сосуде. Эти устройства позволяют не только повысить спектральную жёсткость и яркость излучения, но и управлять параметрами пучков (например, в качестве вигглера – затухателя для уменьшения эмиттанса пучка). Практическая ценность подтверждается и тем, что

ИЯФ СО РАН общепризнанно занимает лидирующие позиции в создании сверхпроводящих генераторов синхротронного излучения и созданные именно в ИЯФ СО РАН сверхпроводящие многополюсные вигглеры используются в качестве вставных устройств на большинстве накопителей в мире: LSU-CAMD (США), BESSY-II (Германия), ELETTRA (Италия), CLS (Канада), DLS (Англия), LNLS (Бразилия), ALBA (Испания), AS (Австралия), ANKA (Германия) и КИСИ (Москва). Дополнительным подтверждением практической ценности можно считать и то, что во многих научных статьях, посвящённые теме сверхпроводящих вставных устройств, в качестве основных примеров реализации таких устройств приводятся ссылки на вигтлеры, созданные именно в ИЯФ СО РАН, например в монографии [1], обзорной статье [2], а так же в учебнике [3].

Личный вклад автора: В представленных в диссертационной работе результатах автор внёс определяющий вклад в постановку задач по созданию периодических магнитных структур с предельно возможным уровнем магнитного поля на основе ниобий-титанового сверхпроводника, оптимизированных для генерации максимального потока фотонов. Так же в ходе работы автором были проведены многочисленные эксперименты и анализ полученных результатов по изучению и устранению различных каналов притока тепла и разработка основных конструктивных решений, послуживших основой для создания криостатов на основе криокулеров, работающих с нулевым расходом жидкого гелия. В постановке отдельных задач и обсуждениях результатов работ активное участие принимали Н.А.Мезенцев, С.В.Хрущев, являющиеся соавторами ряда совместных работ. Существенная часть конструкторских работ по криогенной системе была проведена автором совместно с В.М.Сыроватиным, а по магнитной системе совместно с В.Х.Львом, также являющимися соавторами ряда совместных работ. Фамилии других соавторов совместных исследований указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Апробация работы: Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинаре в Институте ядерной физики им.Будкера

CO PAH и на X, XI, XII, XIII, XIX, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX Международных конференциях по использованию синхротронного излучения (Новосибирск, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 и 2016); XVII, VIII, XIX Международных семинарах по ускорителям заряженных частиц (Алушта, 2001, 2003, 2005); XVIII, XIX, XX, XXI, XXIII Российских Конференциях по ускорителям заряженных частиц (Обнинск, 2002; Дубна, 2004; Новосибирск, 2006; Звенигород, 2008; Санкт-Петербург, 2012); ISTC-RIKEN – Российско – японском рабочем совещании по ускорительным технологиям, 2001, Япония; Международных конференциях Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI-1991, Честер, Англия; SRI-1997, Химедзи, Япония; SRI-2000, Берлин, Германия; SRI-2003, Сан-Франциско, США; SRI-2006, Тэгу, Южная Корея); Международных конференциях по ускорителям заряженных частиц (РАС-2001, Чикаго, США; РАС-2003, Портленд, США); Европейских конференциях по ускорителям заряженных частиц (ЕРАС-2000, Вена, Австрия; ЕРАС-2002, Париж, Франция; ЕРАС-2004, Люцерна, Швейцария); Азиатских конференциях по ускорителям заряженных частиц (АРАС –2001, Пекин, Китай; АРАС-2004, Кенджу, Южная Корея); Международных Конференциях ПО ускорителям заряженных частиц (ІРАС-2011, Сан-Себастьян, Испания; ІРАС-2014, Дрезден, Германия; IPAC2015, Ричмонд, США; IPAC-2016, Пусан, Южная Корея); VII Национальной конференции "Рентгеновское, Синхротронное излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии" РСНЭ-НБИК (Москва, 2009); XIII Международной конференции по криогенной науке и технологиям (Refrigeration Science and (Прага, Чехия), Technology) – ITR-2014 XII Европейской конференции по прикладной сверхпроводимости European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS-2015), Лион, Франция.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 67 печатных работ. Из них 47 в рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus и РИНЦ, а также 20 в трудах российских и международных научных конференций.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Материал работы изложен на 363 страницах

и включает 301 рисунок, 26 таблиц, 1 приложение и список цитируемой литературы из 158 наименований.

Глава 1

Сверхпроводящие вставные устройства для генерации синхротронного излучения

Релятивистская заряженная частица, двигаясь по круговой траектории в поле под действием силы Лоренца, излучает так называемое, магнитном синхротронное излучение (СИ). Начиная со времени первого обнаружения Ф.Хабером в 1947 году синхротронного излучения на синхротроне General Electric с энергией 70 МэВ, оно превратилось в настоящее время в мощный инструмент для исследования вещества. В первое время (1960-1970 г) в качестве источников СИ использовались импульсные электронные синхротроны. Затем, начиная с 70-х годов в качестве источников СИ стали использовать электрон-позитронные накопители, которые разрабатывались в первую очередь для экспериментов на встречных пучках в области физики высоких энергий (источники СИ первого поколения). Некоторые из них используются в таком «паразитном» режиме и по настоящее время. По сравнению с импульсными синхротронами эти установки качественно отличались значительно большей стабильностью и яркостью пучка СИ. Ко второму поколению относятся накопительные кольца. специально спроектированные для генерации СИ, в которых используется излучение из поворотных магнитов. Дальнейшая оптимизация магнитной структуры привела к созданию основного в настоящее время инструмента для исследований в этой области - специализированных накопителей электронов, которые можно классифицировать, как источники СИ третьего поколения. Излучение на этих машинах берётся как ИЗ обычных поворотных магнитов, так И ИЗ специализированных вставных устройств (от английского "insertion devices"), устанавливаемых в специально выделенных длинных прямолинейных промежутках накопителей. Излучение, генерируемое вставными устройствами, обладает более высокой интенсивностью и намного более высокой спектральной яркостью. Последний показатель является наиболее важным параметром, так как определяет фотонов. Несмотря на величину полезного потока τо, что модернизация существующих третьего поколения улучшения источников с целью

пользовательских параметров пучка, ещё далеко не исчерпана, в настоящее время уже ведётся активная разработка источников синхротронного излучения четвёртого поколения высокой интенсивности и яркости, имеющих размеры эмиттанса, меньше, чем 1 нм · рад.

Как можно заключить из вышесказанного, независимо от того, источники какого поколения мы рассматриваем, одним из основных элементов на этих установках, которые определяют их ценность для пользователей, являются именно вставные устройства. Поэтому развитие и совершенствование именно вставных устройств является в настоящее время определяющим в развитии экспериментов с синхротронным излучением.

1.1 Классификация вставных устройств

Жёсткость спектра синхротронного излучения, характеризуемая критической энергией фотонов $\varepsilon_c[K_{\Im}B]$, определяется величиной магнитного поля $B[T_{\Pi}]$ и энергией электронного пучка $E[\Gamma_{\Im}B]$ [4]:

$$\varepsilon_c = 0.665 \cdot B \cdot E^2 \tag{1.1}$$

Из выражения (1.1) видно, что для повышения жёсткости квантов излучения выгоднее всего увеличивать энергию электронов Е в накопителе, так как она входит квадратично. Однако это неизбежно будет связано с коренной модернизацией всей структуры уже существующих установок, что требует больших финансовых вложений. Следовательно, экономически более выгодно было бы идти по пути повышения уровня магнитного поля В в точке излучения. Поэтому в качестве вставных устройств, используемых для сдвигания спектра излучения в наиболее коротковолновую область по сравнению с поворотными магнитами, электромагнитных устройств, работающих на основе оправдано использование сверхпроводимости, которые позволяют получать максимально высокий уровень магнитных полей. Такие устройства, предназначенные для сдвигания спектра, принято называть шифтерами (от английского "shift" – сдвигать).

1.1.1 Шифтеры

Шифтер обычно состоит из одного центрального диполя (полюса) с высоким уровнем магнитного поля и парой боковых полюсов с низким уровнем поля, имеющего противоположное направление, для компенсации искажения орбиты, внесённого центральным полюсом.

Вставное устройство не является основной частью магнитной структуры и не должно ограничивать возможности накопителя и ухудшать качество электронного пучка. Поэтому нужно учитывать влияние магнитного поля вигглера на динамику пучка и при необходимости принимать специальные меры для компенсации этих эффектов. Найдём формальные критерии для замыкания орбиты пучка, движущегося в магнитном поле такого вставного устройства. Движение электронного пучка в системе координат $\{x, s, z\}$ в случае малых угловых отклонений ($x' \ll 1$, $z' \ll 1$) описывается уравнениями [5]:

$$x'' = \frac{e}{\gamma mc} (B_z - z'B_s) \tag{1.2}$$

$$z'' = \frac{e}{\gamma mc} (x'B_s - B_x) \tag{1.3}$$

Для симметричной относительно горизонтальной плоскости магнитной системы существует только вертикальная компонента поля B_z и, следовательно, искажения орбиты в случае входа частицы в поле шифтера точно по оси *s* в медианой плоскости будут происходить только в горизонтальном направлении по координате *x*. В этом случае уравнения движения в горизонтальной плоскости для углового отклонения и смещения орбиты вдоль оси шифтера может быть получено простым интегрированием вдоль промежутка длиной *L*, где устанавливается магнитная система шифтера и магнитное поле на концах которого равно нулю:

$$x'(s) = \frac{e}{\gamma mc} \int_{-L/2}^{s} ds' B_{z}(s')$$
(1.4)

$$x(s) = \frac{e}{\gamma mc} \int_{-L/2}^{s} ds' \int_{-L/2}^{s'} ds'' B_{z}(s'')$$
(1.5)

Условие компенсации поля шифтера, то есть условие, когда орбита электронного пучка не будет испытывать возмущения вне места расположения шифтера, означает, что на выходе из шифтера угол отклонения и смещение орбиты должны быть равны нулю. Но, благодаря механическим погрешностям при изготовлении и сборке магнита и разбалансировке токов в обмотках угол и смещение, на которые отклоняется орбита пучка при прохождении шифтера, могут иметь некоторые ненулевые значения, которые можно получить, интегрируя выражение (1.5) по частям:

$$\delta \mathcal{G} = \frac{e}{\gamma mc} \int_{-L/2}^{L/2} B_z(s) ds = \frac{1}{B\rho} \int_{-L/2}^{L/2} B_z(s) ds = \frac{I_{first}}{B\rho}$$
(1.6)

$$\delta x = -\frac{e}{\gamma mc} \int_{-L/2}^{L/2} sB_z(s) ds = -\frac{1}{B\rho} \int_{-L/2}^{L/2} sB_z(s) ds = \frac{I_{second}}{B\rho},$$
(при условии, что $I_{first} = 0$), (1.7)

где ρ - радиус орбиты, а $B\rho = \frac{\gamma mc}{e}$ - магнитная жёсткость релятивистского электрона, пропорциональная его энергии и определяющая степень отклонения траектории при воздействии магнитного поля.

Иными словами, для замыкания орбиты пучка, пролетающего через магнитное поле вставного устройства, необходимо минимизировать величины первого и второго интегралов магнитного поля вдоль траектории пучка:

$$I_{first} = \int_{-L/2}^{L/2} B_z(s) ds = 0$$
(1.8)

$$I_{sec \, ond} = \int_{-L/2}^{L/2} sB_z(s)ds = 0$$
(1.9)

Таким образом, с точки зрения влияния на динамику пучка именно равенство нулю первого и второго интегралов поля является одним из обязательных условий, накладываемых на выбор как схемы установки шифтера на накопитель, так и геометрии магнитного поля непосредственно внутри шифтера.

Неравенство нулю первого или второго интеграла поля приводит к искажению орбиты в накопителе. Можно вывести критерий для оценки качества компенсации магнитного поля вставного устройства с точки зрения влияния на пучок накопителя, принимая во внимание бетатронную частоту v_x и бета-функцию β_x в месте

установки вигглера и сравнивая величину ошибок, вносимых вигглером с размерами естественного эмиттанса ε_x :

$$\delta\vartheta < 2\sin(\pi\nu_x)\sqrt{\varepsilon_x/\beta_x} \tag{1.10}$$

$$\delta x < 2\sin(\pi\nu_x)\sqrt{\varepsilon_x \cdot \beta_x} \tag{1.11}$$

Если эти условия выполняются, то искажения орбиты в горизонтальном направлении при включении вигглера будут меньше размера пучка электронов, и не будут влиять на пучок.

С точки зрения генерации синхротронного излучения для знакопеременных магнитов с большим уровнем магнитного поля и большим периодом, которым является шифтер, длина формирования излучения много меньше периода изменения магнитного поля. Поэтому характеристики синхротронного излучения с каждого участка траектории определяются локальной кривизной этого участка и для описания результирующего излучения можно использовать формулы синхротронного излучения для случая движения электронов по круговой образом проинтегрированные траектории, соответствующим по траектории электронов. Подробный анализ характеристик синхротронного излучения был произведён, например, в работе [4]. Поэтому можно ограничиться рассмотрением только наиболее важных практических формул, описывающих синхротронное излучения с точки зрения потребительских свойств в качестве генератора излучения. Кванты, излучаемые под некоторым углом \mathcal{G} по касательной к электронному пучку с энергий E с некоторого участка траектории, находящемся в магнитном поле B, широкий спектр. Спектральный поток имеют фотонов с энергией ε. проинтегрированный по вертикальному углу, можно представить как:

$$\frac{dN(\varepsilon)}{d\vartheta} = 2.457 \cdot 10^{16} \cdot E[\Gamma \ni B] \cdot I[A] \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c(\vartheta)} \int_{\varepsilon/\varepsilon_c(\vartheta)}^{\infty} K_{5/3}(x) \cdot dx, \qquad (1.12)$$

где $K_{5/3}(x)$ - модифицированная функция Бесселя 2 рода.

Общую мощность, приходящуюся на 1 мрад горизонтального угла и проинтегрированную по вертикальному углу и энергиям квантов, можно выразить как:

$$P_{tot}(\mathcal{G})[W / Mpa\partial] = 4.2 \cdot B(\mathcal{G})[T\pi] \cdot E^{3}[\Gamma \ni B] \cdot I[A]$$
(1.13)

Рассмотрим возможные схемы распределения магнитного поля в шифтере, которые удовлетворяли бы условию замыкания орбиты. В простейшем случае трёхполюсный шифтер состоит из центрального диполя с большим уровнем поля и двух боковых диполей с малым полем для компенсации орбиты. Продольное распределение поля, форма траектории и угловое отклонение пучка в трёхполюсном шифтера условно представлены на Рисунке 1 1.

Эта схема имеет чисто геометрический недостаток, так как при изменении уровня поля происходит горизонтальное отклонение орбиты, и точка излучения смещается от оси накопителя, что приводит к неудобству при работе с излучением. Проблема смещения точки излучения была решена автором данной работы установкой на вигглере, созданном в ИЯФ СО РАН для накопителя LSU-CAMD (Луизиана, США) двух дополнительных тёплых корректоров, таким образом, чтобы траектория пучка всегда находится в геометрическом центре шифтера и точка излучение была неподвижна при любом магнитного [114]. уровне ПОЛЯ Распределение магнитного поля и форма траектории пучка для трёхполюсного шифтера с неподвижной точкой излучения представлены на Рисунке 2.







Рисунок 2. Распределение магнитного поля 7 Тл шифтера LSU-CAMD с неподвижной точкой излучения для разных уровней поля и соответствующее отклонение орбиты пучка.

Ещё одна особенность шифтеров, называемая проблемой «второго источника», связана с наложением излучения из центрального и боковых полюсов под одним и тем же углом, что также создаёт помехи при проведении экспериментов. Для подавления влияния второго источника можно уменьшать уровень поля на боковых полюсах. С одной стороны, это позволяет разнести спектры излучения по энергиям в соответствие с выражением (1.1), и как показано на Рисунке 3. С другой стороны, это снижает общую мощность излучения из боковых полюсов в соответствие с формулой (1.13), как представлено на Рисунке 4. Однако снижение уровня поля неизбежно приводит к увеличению длины боковых полюсов для зануления

интеграла поля $I_{first} = \int_{-L/2}^{L/2} B_z(s) ds = 0$ и, соответственно, общей длины шифтера.





Рисунок 3. Зависимость Рисунок 4. Угловое распределение мощности критической энергии фотонов ε_c от излучения из шифтера с неподвижной точкой горизонтального угла в шифтере с ^{ИЗЛУЧЕНИЯ.}

1.1.2 Многополюсные вигглеры и ондуляторы

Однако наиболее эффективно использование в качестве вставных устройств не трёхполюсных, а многополюсных сверхпроводящих магнитов со знакопеременным периодическим полем. Форма поля в такой периодической магнитной структуре в простейшем случае будет иметь вид $B_z(s) = B_0 \sin(2\pi s/\lambda_0)$, где λ_0 – пространственный период структуры. Таким образом, на протяжении длины

 $L = N \cdot \lambda_0$ (где N – число периодов) электронный пучок будет двигаться по синусоидальной траектории. В этом случае появляется возможность одновременно, как смещать спектр излучения в коротковолновую область, увеличивая уровень магнитного поля за счёт сверхпроводящих технологий, так и повышать яркость излучения, которая прямо пропорциональна числу магнитных полюсов. Такие многополюсные вставные устройства принято разделять, в зависимости от коэффициента ондуляторности K, на вигглеры с $K \gg 1$ (от английского "wiggle" – покачивание) и на ондуляторы с $K \leq 1$ (от французского "ondulation " – колыхание). Вообще говоря, граница между этими двумя типами устройств весьма условна. Вставное устройство со знакопеременными полями можно считать вигглером, если угол θ_e поворота траектории электронов в нем на протяжении полюса одного знака намного больше угла естественной расходимости синхротронного излучения $\theta_{SR} \sim 1/\gamma$, где γ - релятивистский фактор, равный отношению $\gamma = \frac{E}{E_0}$, где E - полная ускоренного электрона, а $E_0 = m_e c^2$ -энергия покоя электрона. энергия Ондулятором же называют знакопеременное вставное устройство, в котором на протяжении одного полюса отклонение пучка θ_e намного меньше угла θ_{SR} . Так, например, если для типичного накопителя с энергией пучка 2 ГэВ релятивистский $\gamma = \frac{E}{E_0} \sim \frac{2000 \text{ МэB}}{0.511 \text{ МэB}} \sim 3914$, то, соответственно, характерным углом для фактор проведения формальной границы между вигглером и ондулятором можно считать $\theta_{SR} \sim \frac{1}{\nu} = \frac{1}{3914} = 0.25$ мрад. Таким образом, коэффициент ондуляторности можно определить, как отношение угла отклонения орбиты пучка к углу расходимости синхротронного излучения $K = \theta_e / \theta_{SR}$ и значение его в системе единиц СИ равно [6]:

$$K = \frac{eB_0\lambda_0}{2\pi m_c} = 93.4B_0\lambda_0 , \qquad (1.14)$$

где $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл - заряд электрона, $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона, $c = 3 \cdot 10^8 \,\text{M}/\text{сек}$, B_0 [Тл] – максимальное значение синусоидального магнитного поля на одном полюсе вставного устройства, а λ_0 [М] – длина периода (двух полюсов) вставного устройства. В практических единицах коэффициент ондуляторности принято вычислять, как:

$$K = 0.934 \cdot B_0[\mathrm{T}\pi] \cdot \lambda_0[\mathrm{C}\mathrm{M}] \tag{1.15}$$

Можно сказать, что в вигтлере «конусы», в которые излучаются фотоны из каждого отдельного полюса, не перекрываются между собой и располагаются в пространстве в форме горизонтального веера (см. Рисунок 5), а у ондулятора, благодаря его короткому периоду, эти «конусы» складываются в одном направлении и между ними наблюдается интерференция, как показано на Рисунке 6. Благодаря этому излучение из вигтлера является некогерентным и спектр его имеет квазинепрерывную форму. Излучение же из ондулятора является когерентным, его спектр имеет линейчатую форму и состоит из набора гармоник. Однако можно отметить, что у вигтлеров с короткими периодами может также наблюдаться одновременно как ондуляторный спектр в области малых энергий фотонов, так и непрерывный на больших энергиях. Физические принципы работы ондулятора были предложены в СССР В.Л. Гинзбургом в 1947 году [7], а спустя несколько лет первый ондулятор создал и испытал на пучке линейного ускорителя H.Motz [8].

Длина волны λ_n , соответствующая максимуму линии ондуляторного излучения зависит от периода λ_0 , параметра ондуляторности *K* и релятивистского фактора электронного пучка γ :

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{\kappa^2}{2} + \theta^2 \gamma^2 \right), \tag{1.16}$$

где n = 1,2,... - номер гармоники, а θ – угол наблюдения излучения, относительно орбиты пучка. Спектральная ширина пика пропорциональна $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \sim 1/(n \cdot N)$, где N – число периодов ондулятора, а так же поперечным размером и энергетическим разбросом электронного пучка. Условно различие спектров из поворотного магнита, вигглера и ондулятора показано на Рисунке 7.



Рисунок 5. Излучение из вигглера ($K \gg 1$) [9] Рисунок 6. Излучение из ондулятора



Рисунок 7. Условное изображение спектров, генерируемых поворотным магнитом, вигглером и ондулятором.

С точки зрения востребованности конкретной области спектрального диапазона для различных исследований наибольший интерес представляют ондуляторы, имеющие коэффициент ондуляторности К~1. Для того чтобы условие вставное устройство генерировало выполнялось ЭТО И именно необходимо либо иметь короткий период λ₀ и ондуляторный тип излучения высокий уровень магнитного поля *B*₀, либо длинный период и низкий уровень поля. Очевидно, что именно короткопериодные ондуляторы будут генерировать излучение в коротковолновой области спектра, которая, вообще говоря, и представляет наибольший интерес для большинства экспериментов. Практически достижимые параметры такого ондулятора составляют, например, поле В₀~1Тл при величине периода $\lambda_0 \sim 1.5$ см.

Можно отметить ряд дополнительных преимуществ, которые даёт установка на накопитель сверхпроводящих вставных устройств:

1. При изменении тока в обмотках появляется возможность повысить "гибкость" экспериментов с синхротронным излучением, оперативно изменяя величину магнитного поля, а, следовательно, и критическую энергию излучаемых фотонов. Правильно скомпенсированные интегралы позволяют локально изменять поле таким образом, чтобы орбита электронного пучка не испытывала бы на себе какого-либо воздействия вне промежутка, где установлен вигглер. Таким образом, можно проводить многочисленные эксперименты на остальной части накопительного кольца, независимо от текущего режима работы вигглера.

2. Существует возможность использования в экспериментах излучения с круговой или эллиптической поляризацией, которое может генерироваться специальными вигглерами асимметричного типа или устройствами, в которых электронный пучок имеет винтовую траекторию [10, 11].

3 Помимо непосредственно генерации синхротронного излучения вигглеры могут использоваться и для изменения некоторых характеристик электронных пучков в накопителях. Присутствие вигглера в магнитной структуре накопителя приводит к эффектам, как радиационного затухания, так и квантового возбуждения, что влечёт за собой изменение (увеличение или уменьшение) длины электронного сгустка, времени затухания, энергетического разброса и эмиттанса пучка [12]. Было предложено несколько различных вигглеров с соответствующей конфигурацией магнитного поля. В работе [13] описан вигглер, используемый для изменения эмиттанса, энергетического разброса, времён затухания. Использование градиентного поля ведёт к изменению декрементов затухания, что было впервые предложено как средство управления декрементами затухания [14]. Устройство такого типа было впервые использовано в С.Е.А. для возможности работы в качестве накопительного кольца [15]. Были предложены и нелинейные вигглеры с секступольными и октупольными компонентами поля для изменения формы пучка и энергетического распределения [16, 17, 18].

4. Кроме того, используя магнитное поля вигглера можно управлять поляризацией спинов электронов [13]. Благодаря излучению фотонов электронные

спины имеют тенденцию выстраиваться в вертикальном направлении (эффект Соколова - Тернова) [19]. Поэтому ассиметричные вигглеры могут использоваться для уменьшения времени поляризации электронных и позитронных пучков, что является полезным для проведения экспериментов по физике высоких энергий.

5. вигглеров Использование с экстремально высокой величиной магнитного поля на накопителях, имеющих высокую энергию электронного пучка, может даже привести к появлению совершенно новых источников заряженных частиц, генерация которых ранее была прерогативой совершенно других областей физики. Например, в работе [119] был предложен проект по генерации медленных позитронов при использовании сверхпроводящего вигглера с полем 10 Тл, созданного в ИЯФ СО РАН для SPring-8 (Япония). Причём, на накопителя предполагается, что интенсивность такой генерации будет заметно превосходить интенсивность обычных источников медленных позитронов.

наиболее Для создания вигглеров использование оправдано электромагнитов со сверхпроводящими обмотками, работающими при температуре жидкого гелия, что позволяет получать большую плотности тока для концентрации магнитного потока и достижения высокого значения магнитного поля, что приводит к уменьшению габаритов магнита и возможности использовать маломощные источники питания для запитки обмоток. В качестве недостатка следует отметить необходимость использования специального дорогостоящего криогенного оборудования для обеспечения работы сверхпроводящих устройств. Однако именно в условиях крупных научно-исследовательских центров, каковыми и являются обычно специализированные накопители заряженных частиц, развитие криогенного хозяйства для производства жидкого гелия является оправданным. Ожижители гелия и другое сопутствующее оборудование может быть использовано при этом одновременно и для работы других сверхпроводящих устройств (например, криогенных детекторов частиц). Вообще говоря, наличие эффективной криогенной инфраструктуры, предполагающей возврат и повторное ожижение испарённого гелия. позволяет создавать целые комплексы специализированных источников синхротронного излучения на основе сверхпроводящих магнитов. Так, например, в начале 1990-х годов в ИЯФ СО РАН были разработаны несколько компактных источников СИ с использованием сверхпроводящих магнитов, которые могли бы перекрыть весь востребованный пользователями диапазон энергий квантов для различных исследований [92].

Следует отметить, что первый в мире 20-полюсный сверхпроводящий вигглер с полем 3.5 Тл и периодом 9 см был также создан в ИЯФ СО РАН и установлен на накопитель ВЭПП-3 в 1979 году [**20**, **21**].

1.2 Состояние развития сверхпроводящих вставных устройств в мире

Создание таких технически сложных устройств, как сверхпроводящие вигглеры, исходя из чистого научного интереса, не всегда оказывается возможным с точки зрения необходимых для этого финансовых затрат. При изготовлении таких приборов, стоимость которых граничит с 1 млн. долларов, наряду с научной задачей, всегда неизбежно стоит и финансовый вопрос. Поэтому, прежде всего, должна назреть реальная научная необходимость в появлении таких устройств, которая определяется как постановкой пользователями синхротронного излучения новых научных задач, для исследования которых требуется излучение со свойствами, которые ранее ещё не были доступны, так и реальными финансовыми возможностями пользователей для осуществления таких проектов.

Кроме того, нельзя не принимать в расчёт всегда присутствующий неизбежный инженерный риск, который может и не оправдать затраченных финансовых вложений. Можно было бы привести немало реальных примеров, когда производители таких уникальных устройств, создание которых всегда сопряжено с решением большого числа как научных, так и чисто технических и технологических проблем, потерпели неудачу и не смогли обеспечить требуемых параметров. В этой связи вполне понятны рассуждения, приведённые в работе [22], где формулируются основные технические требования к новому сверхпроводящего вигтлеру затухателю, который необходимо было установить на лазер на свободных электронах LCLS в ускорительном центре SLAC (США) для подавления нестабильности пучка. Здесь возникла необходимость в вигглере с уровнем поля белее 5 Тл, что однозначно предполагало использование только сверхпроводящих технологий. Однако в выборе концепции был использован весьма консервативный выраженный в предпочтительном использовании любой, подход, но уже существующей конструкции, пусть даже не самой оптимальной и современной, но уже проверенной и, следовательно, понижающей возможные технические риски. В частности, утверждая, что новая разработка такого нестандартного устройства, как вигглер, весьма рисована и потребует самых новейших технологий, авторы остановили свой выбор на уже существующей конструкции вигглера от компании Oxford Instruments [23], в котором использовался неоптимальный криостат с расходом жидкого гелия ~2.5 л/час и срок изготовления оценивался в 3.5 года. Этот пример лишний раз подчёркивает, какое внимание придаётся вопросам надёжности при установке вставных устройств на работающий ускоритель.

С другой стороны, научный прогресс, происходящий в развитии какого-либо направления, например, в создании тех же сверхпроводящих вставных устройств, указывает исследователям на появляющуюся реальную техническую возможность создания необходимого прибора для исследований и подталкивает пользователей синхротронного излучения к поиску финансовой возможности для его создания. "штучных" дорогостоящих Поэтому создание таких И приборов, как сверхпроводящие вставные устройства, невозможно без взаимного встречного движения, как со стороны производителя, так и со стороны потенциального заказчика – пользователя синхротронного излучения.

Реальная ситуация на "рынке" сверхпроводящих вставных устройств сложилась таким образом, что к началу 2000-х годов интерес в мире к «обычным» шифтерам, только сдвигающим спектр синхротронного излучения в коротковолновую область, был по большей части удовлетворён. Кстати говоря, автор данной уже диссертационной работы принял непосредственное участие в насыщении «рынка» вставных устройств такими шифтерами. При непосредственном участии автора были созданы несколько трёхполюсных шифтеров с высоким уровнем магнитного поля, многие из которых, имея рекордные (и до сих пор никем не продемонстрированные параметры), продолжают успешно использоваться для генерации синхротронного излучения в крупнейших мировых научных центрах. В частности, были созданы такие устройства, как:

1. 7.5 Тл шифтер для накопителя PLS (Pohang Light Source) в Южной Корее в 1995 году [**93**, **94**];

2. 7 Тл шифтер с неподвижной точкой излучения для накопителя CAMD (Center for Advanced Microstructures and Devices), работающий на базе LSU (Louisiana State University) в США в 1998 году [**95**, **97**, **114**];

3. 7 Тл шифтер для лаборатории BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung) на источнике СИ BESSY-II в Берлине в 2000 году [**100, 102, 111**];

4. 7 Тл шифтер для лаборатории PSF (Protein Structure Factory) на источнике СИ BESSY-II в Берлине в 2001 году [**106**, **107**, **109**, **110**, **111**];

5. 10 Тл шифтер для источника медленных позитронов на накопителе Spring-8 (Япония) в 2000 году [**99, 103, 112, 119**].

Основные характеристики вышеперечисленных сверхпроводящих шифтеров, созданных в ИЯФ СО РАН, представлены в Таблице 1.1. В Таблице 1.2 для сравнения приведены данные о шифтерах, которые параллельно создавались в других лабораториях в мире.

Из сравнения данных, представленных в Таблице 1.1 и Таблице 1.2, можно сделать вывод о том, что шифтеры, созданные в ИЯФ СО РАН, чаще всего имели рекордные параметры по сравнению с конкурирующими устройствами. B частности, уровень достигнутого максимального поля всегда значительно превышал проектный, приближаясь при этом на ~90 % к току короткого образца. Важно отметить, что для катушек такого большого размера это очень хороший показатель. В частности, это означает, что из конкретного сверхпроводящего провода, использованного для изготовления катушек, были «выжаты», практически, предельное параметры. Кроме того, на шифтерах, созданных в ИЯФ СО РАН, такой важный эксплуатационный параметр, как расход жидкого гелия, неуклонно снижался за счёт непрерывного совершенствования криогенной системы и даже на фоне таких уже вполне современных вставных устройств, как шифтер для TLS, созданный в 2006 году и имеющий расход гелия 1.3 л/ч, расход на уровне 0.6 л/ч у шифтеров, созданных в ИЯФ СО РАН в начале 2000-х годов, смотрелся вполне оптимистично.

Таблица 1.1. Основные характеристики высокополевых сверхпроводящих шифтеров, созданных в ИЯФ СО РАН

Название центра и	PLS,	LSU-CAMD,	Spring-8,	BAM-WLS,	PSF-WLS,
местоположение,	Pohang,	Louisiana,	Химедзи,	BESSY-II,	BESSY-II,
год	Ю.Корея,	CIIIA,	Япония,	Берлин,	Берлин,
	1995	1998	2000	Германия,	Германия,
				2000	2001
Макс.поле, Тл	7.5/7.68	7.0/7.55	10.0/10.3	7.0/7.5	7.0/7.5
Проектное /Реальное					
Число полюсов	3	3	3	3	3
Межполюсной	48	51	40	52	52
зазор, мм					
Апертура для пучка,	26	32	20	32	32
ММ					
Материал обмоток	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti
			$+Nb_3Sn$		
Ток в обмотке, А	235	240	300 (Nb-Ti)	240	240
Ток в обмотке/	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
Ток короткого					
образца					
Поле на обмотке	8.2	7.7	6.3	7.7	7.7
Поле на орбите	7.5	7.0	6.0	7.0	7.0
Длина центрального	170	172	200	172	172
полюса, мм					
Длина магнита, мм	800	972	1042	972	972
Запас энергии, кДж	100	140	256	140	140
Мощность					
излучения, кВт	3.6	5.3	100	13	13
(Е, ГэВ; I, А)	(2; 0.1)	(1.5; 0.3)	(8; 0.1)	(1.9; 0.5)	(1.9; 0.5)
Расход жидкого	3	1.5	0.9	0.6	0.6
гелия, л/час					

Название центра и	MAX-LUND,	Oxford Instr.,	TLS,	
местоположение, год,	Швеция,	Daresbury,	Taiwan,	
источник информации	1992, [24]	. 992, [24] Англия, 1991, [25]		
Макс. поле, Тл	7.6/4.4	6 / 6	6.5/ 6.5	
Проектное /Реальное				
Число полюсов	3	3	3	
Межполюсной зазор, мм	36	-	50	
Апертура для пучка, мм	15		20	
Материал обмоток	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	
Ток в обмотке, А	335	-	307	
Ток в обмотке/	0.48	-	0.73	
Ток короткого образца				
Поле на обмотке	4.7	6.3	8.2	
Поле на орбите	4.4	6.0	6.5	
Длина полюса, мм	244	~200	~200	
Запас энергии, кДж	337	256	450	
Расход жидкого гелия, л/час	4.5	-	1.3	

Таблица 1.2. Основные характеристики некоторых сверхпроводящих шифтеров, созданных в мире

Следовательно, имелась хорошая база для продвижения в создании следующего нового типа вставных устройств - многополюсных вигглеров, потребность в которых уже реально назрела во многих мировых исследовательских центрах в начале 2000-х годов. Об этом свидетельствует и то, что в это время во многих крупнейших центрах синхротронного излучения начинали предпринимать серьёзные шаги для создания именно многополюсных вигглеров, дающих значительный выигрыш по потоку фотонов, который пропорционален количеству полюсов. Лучшие результаты этих работ представлены в Таблице 1.3, где приведены наиболее характерные параметры, достигнутые на многополюсных сверхпроводящих вигглерах, созданных к началу 2000-х годов в мире.

1	5			
Photon	Oxford	ACCEL,	Danfysik,	Taiwan
Factory,	instr.	DELTA,	MAX-lab,	Light
КЕК, Япония,	NSLS,	Германия	Lund, Sweden,	Source,
1989, [27]	1997,	1997, [28]	2001, [29]	2004, [30]
	[23]			
5.8	5.5	5.5	3.54	3.2
4.8		5.3		3.1
400	171.6	288	61	64
66	40	18	12	19
31	19.5	10	10.2	11
5	11+2	10	47+2	28+4
-	88	149	21.2	19.1
220	-	-	-	285
232	-	94	38.4	50
0.8	-	-	-	-
-	-	-	1512	1400
0.12	2.18	0.5	2.5	2.5
	Рhoton Factory, KEK, Япония, 1989, [27] 5.8 4.8 400 66 31 5 - 220 232 0.8 - 0.12	РhotonOxfordFactory,instr.KEK, Япония,NSLS,1989, [27]1997,[23]5.85.85.54.8400400171.666403119.5511+2-88220-232-0.80.8-2.18	Рhoton Factory, (Instr.Oxford instr.ACCEL, DELTA, Германия 1989, [27]1989, [27]1997, 1997, [23]1997, [28] [23]5.85.55.54.85.3400171.62886640183119.510511+210-88149220232-940.80.122.180.5	Рhoton Factory, I 1989, [27] Oxford instr. ACCEL, DELTA, DELTA, IP97, [28] Danfysik, MAX-lab, Lund, Sweden, 2001, [29] 5.8 5.5 5.5 3.54 4.8 5.3 - - 400 171.6 288 61 66 40 18 12 31 19.5 10 10.2 5 11+2 10 47+2 - 88 149 21.2 200 - - - 232 - 94 38.4 0.8 - - 1512 0.12 2.18 0.5 2.5

Таблица 1.3. Основные характеристики сверхпроводящих многополюсных вигглеров, созданных в мире к началу 2000-х годов

Опираясь на данные, представленные в Таблице 1.3, можно сделать вывод о том, что проблемой получения экстремально высоких значений магнитных полей в сверхпроводящих многополюсных вигглерах занималось довольно много специализированных групп в различных научных центрах, но не везде были достигнуты желаемые результаты. В частности, уровень реального достигнутого поля нередко был ниже запланированного и при этом абсолютная величина поля не превышала ~6 Тл. Это, вероятно, можно объяснить тем, что в такой специфической области, как проектирование сверхпроводящих устройств, очень многое зависит от

удачно выбранной конструкции как самих сверхпроводящих обмоток, так и всей системы в целом, включая магнитопровод и способ бандажирования обмоток. Кроме того, реальная величина расхода гелия редко была меньше, чем ~2 л/ч, что подразумевало заправку хладагентами в лучшем случае не реже, чем раз в несколько дней. При этом, чаще всего, для заправки бывает необходимо останавливать работу накопителя. Учитывая, что источники синхротронного излучения предназначены для работы в непрерывном режиме и остановки для профилактических работ планируются на них заранее за несколько месяцев вперёд, такой расход становился уже абсолютно неприемлемым с точки зрения эффективной работы накопителей.

Таким образом, комплексная проблема создания многополюсных вставных устройств с максимально высоким потоком фотонов за счёт достижения предельно возможного уровня магнитного поля и оптимизации параметров магнитной структуры, а также задача уменьшения расхода жидкого гелия до приемлемых значений, позволяющих непрерывную эксплуатацию сверхпроводящих вигглеров по крайней мере в течение нескольких месяцев, стала более чем актуальной.

1.3 Постановка задачи

Учитывая актуальность данной темы, автором были сформулированы следующие задачи, решение которых и является основной целью данной диссертационной работы:

1. Разработать методику расчёта оптимальной конфигурации многополюсной сверхпроводящей магнитной структуры, обеспечивающую генерацию максимально возможного потока фотонов синхротронного излучения в требуемом для экспериментов диапазоне, исходя из конкретных требований по величине вертикальной апертуры накопителя (по условиям инжекции и времени жизни пучка), а также доступного для размещения магнита свободного пространства и других ограничений со стороны конкретного накопителя, учитывая при этом реальные характеристики коммерчески доступных сверхпроводящих проводов для изготовления обмоток;

2. Разработать концепцию запитывания сверхпроводящих обмоток многополюсной магнитной структуры, позволяющую настраивать конфигурацию магнитного поля таким образом, чтобы не оказывать отрицательного влияния на характеристики электронного пучка в каждом конкретном накопителе;

3. Разработать технологию изготовления сверхпроводящих обмоток, позволяющую стабильно получать предельно возможный уровень магнитного поля на обмотках в форме рэйстрека, используемых в условиях повышенной радиации со стороны электронного пучка и исходя из конкретных характеристик доступных сверхпроводящих проводов, максимально приблизившись к их техническому пределу – току короткого образца;

4. Разработать концепцию защиты сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров, надёжно защищающую обмотки от разрушения при выходе из сверхпроводящего состояния и обеспечивающие регистрацию перехода в нормально-проводящее состояние, исключающую ложные срабатывания;

5. Исследовать возможность создания и разработать концепцию криогенной системы, обеспечивающую надёжную автономную работу сверхпроводящего вставного устройства в закрытой для обслуживания радиационной зоне ускорителей в течение длительного времени с минимально возможным расходом жидкого гелия и учитывающую дополнительную тепловую и радиационную нагрузку со стороны электронного пучка.
Глава 2

Особенности проектирования многополюсных сверхпроводящих вставных устройств

В отличие от шифтеров, предназначенных сдвигания спектра ДЛЯ синхротронного излучения в коротковолновую область по сравнению с поворотными магнитами, многополюсные вигглеры позволяют не только сдвигать спектр, но и многократно увеличивать поток фотонов за счёт большого числа полюсов. Интенсивность излучения из последовательно расположенных полюсов с чередующимся направлением магнитного поля, суммируется под данным углом из разных полюсов вигглера. Орбита при этом представляет собой извилистую линию, и угол орбиты изменяется в пределах некоторого значения. Каждое вставное устройство предназначается для генерации излучения с заранее заданными свойствами, зависящими как от конкретной исследовательской задачи, так и от характеристик накопительного кольца, на котором будет работать это устройство. Каждый накопитель имеет уникальные технические параметры, такие как энергия и ток электронов, периметр и размеры вакуумной камеры, особенности магнитной структуры. Поэтому при проектировании каждого вставного устройства, которое уникально само по себе и разрабатывается непосредственно для конкретного накопителя, всегда необходимо сделать оптимальный выбор многих параметров, таких как требуемой величины магнитного поля, числа полюсов и магнитного зазора, чтобы обеспечить требуемые свойства синхротронного излучения и, в тоже время, не ухудшить характеристики накопителя. К тому же, при сохранении общего подхода для всех вставных устройств, выбор компоновки основных узлов, а тем более конкретных технических решений может сильно отличаться, в зависимости от требуемых параметров.

2.1. Оптимизация основных параметров многополюсных вигглеров

Основными параметрами вставного устройства, с точки зрения генерации излучения, которые в большой степени и определяют его конструкцию в целом, являются уровень максимального магнитного поля B_0 в медианной плоскости вигглера и величина периода магнитной структуры λ_0 . Соотношение этих двух параметров определяет величину межполюсного зазора g, при которой можно технически обеспечить одновременное выполнение этих двух параметров. Рассмотрим периодическую магнитную структуру из горизонтально расположенных магнитных полюсов с некоторым периодом λ_0 и межполюсным зазором g в координатах {x, s, z}, как показано на Рисунке 8.



Рисунок 8. Общий вид периодической магнитной структуры с периодом λ_0 и магнитным зазором *g* в координатах {*x*, *s*, *z*}.

Естественно предположить, что периодическое магнитное поле на оси такого устройства определяется скалярным потенциалом также периодического вида:

$$\varphi(s,z) = f(z)\cos\left(2\pi\frac{s}{\lambda_0}\right) = f(z)\cos(k_0 s) , \qquad (2.1)$$

где $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$.

Используем скалярный потенциал, так как будем описывать магнитное поле в пространстве между магнитными полюсами, не занятой токами, иначе было бы необходимо использовать векторный потенциал. Будем рассматривать двумерный случай, так как можно считать, что магнит неограничен в поперечном направлении x и поле неизменно по этой координате. Вертикальную функцию f(z), отвечающую за амплитуду периодической функции $\varphi(s, z)$, можно оценить из уравнения Лапласа [**31**]:

$$\nabla^2 \varphi(s, z) = 0 \tag{2.2}$$

Подставляя выражение (2.1) в формулу (2.2), получим дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{d^2 f(z)}{dz^2} - f(z)k_0^2 = 0$$
(2.3)

Это уравнение, являющееся однородным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами, имеет решение в виде:

$$f(z) = A\sinh(k_0 z) \tag{2.4}$$

Подставляя выражение (2.4) в формулу для скалярного потенциала (2.1), получим:

$$\varphi(s, z) = A \sinh(k_0 z) \cos(k_0 s)$$
(2.5)

На пучок внутри магнита в медианной плоскости будет воздействовать только вертикальная составляющая магнитного поля, которую можно получить из выражения для скалярного потенциала, как:

$$B_z(s,z) = \frac{\partial \varphi(s,z)}{\partial z} = k_0 A \cosh(k_0 z) \cos(k_0 s)$$
(2.6)

Неизвестную константу A можно оценить, введя понятие максимальной напряжённости магнитного поля на поверхности магнитного полюса B_p , как показано на Рисунке 9.



Рисунок 9. Параметры, характеризующие магнитное поле в периодической магнитной структуре.

В соответствие с выражением (2.6), максимальная величина поля B_p на поверхности полюса при z = g/2 и s = 0 будет равна:

$$B_p = B_z \left(0, \frac{g}{2}\right) = k_0 A \cosh\left(k_0 \frac{g}{2}\right) = k_0 A \cosh\left(\pi \frac{g}{\lambda_0}\right)$$
(2.7)

Откуда можно выразить константу А как:

$$A = \frac{B_p}{k_0 \cosh\left(\pi \frac{g}{\lambda_0}\right)}$$
(2.8)

Таким образом, можно записать окончательное выражение для величины поля на орбите пучка как:

$$B_{z}(s, z) = B_{0} \cosh(k_{0} z) \cos(k_{0} s), \qquad (2.9)$$

где максимальное поле на оси пучка выражается как:

$$B_0 = \frac{B_p}{\cosh\left(\pi \frac{g}{\lambda_0}\right)} \tag{2.10}$$

Из анализа этого выражения можно сделать вывод, что максимальное поле на оси пучка быстро затухает с увеличением магнитного зазора. Этот эффект хорошо виден на Рисунке 10, где представлена зависимость отношения величины максимального поля на орбите к полю на поверхности магнитного полюса B_0/B_p от соотношения магнитного зазора и периода магнитной структуры g/λ_0 .



Рисунок 10. Зависимость отношения величины максимального поля на орбите к полю на поверхности магнитного полюса B_0/B_p от соотношения магнитного зазора и периода магнитной структуры g/λ_0 .

Для численного представления магнитных структур, в которых поле B_0 на медианной плоскости создается периодически изменяющимися магнитными полями, создающимися полюсами, расположенными с некоторым межполюсным зазором вдоль этой плоскости, принято использовать формулу Халбаха (Halbach), которая была предложена для описания периодической структуры из постоянных магнитов и в общем виде выглядит как [**32**]:

$$B_0 = a \cdot e^{\left[b \cdot \left(\frac{g}{\lambda_0}\right) + k \cdot \left(\frac{g}{\lambda_0}\right)^2\right]}$$
(2.11)

Здесь значения эмпирических коэффициентов a, b и k зависят от конкретной конструкции магнитной структуры. При этом коэффициент a определяет пиковый уровень поля на поверхности магнитной структуры, а коэффициенты b и k показывают зависимость, по которой изменяется магнитное поле внутри магнитного межполюсного зазора.

В частности для сверхпроводящего многополюсного вигглера поле, период и зазор связаны между собой следующим соотношением:

$$B_0 = \frac{B_p}{\cosh\left(\pi\frac{g}{\lambda_0}\right)} \approx B_p \cdot e^{\left[-\pi \cdot \left(\frac{g}{\lambda_0}\right) - 2, 2 \cdot \left(\frac{g}{\lambda_0}\right)^2\right]} \approx B_p e^{-\pi\frac{g}{\lambda_0}} , \qquad (2.12)$$

где B_p - величина максимального магнитного поля на поверхности полюса магнита, определяемая геометрией магнита и критическими характеристиками используемого сверхпроводника. Зависимость отношения B_0/B_p от g/λ_0 , представленная на Рисунке 10, позволяет оценить возможности проектируемой конструкции конкретного сверхпроводящего вставного устройства с точки зрения максимального использования свойств данного сверхпроводящего провода для получения требуемых параметров поля и периода.

Из графика можно сделать вывод, что при зафиксированном поле на обмотке (определяется в основном токонесущими параметрами провода) для увеличения поля на орбите пучка выгодно либо уменьшать зазор, либо увеличивать период, либо делать это одновременно. Однако использовать впрямую формулу (2.12) нужно с некоторыми ограничениями. Дело в том, что, в отличие от постоянных магнитов, в которых величина поля на поверхности совпадает с полем внутри магнита, поле в реальной сверхпроводящей обмотке распределено таким образом, что существует область с максимальным полем, уровень которого ограничивает величину тока в обмотке, согласно критическим характеристикам данного провода. Соотношение максимального тока и магнитного поля в этой области обмотки можно принять как критический параметр для оценки теоретически доступного уровня поля в данной обмотке. Только после этого уже можно пересчитать какую величину будет иметь поле B_p на поверхности обмотки, которое, вообще говоря, только приблизительно

характеризует всю обмотку как источник, создающий поле на орбите. Правильнее рассматривать поле в интересующей точке на медиане как суперпозицию полей, создаваемых каждым отдельным проводником обмотки. Поэтому нужно понимать, что использовать формулу (2.12) можно только для предварительной оценки с точностью, не лучшей ~10%.

Как следует из формулы (2.12), для увеличения уровня максимального поля B_0 необходимо уменьшать высоту межполюсного зазора g, приближая, тем самым, обмотки, создающие магнитное поле B_n , поближе к медиане. Однако возможность уменьшать зазор ограничивается требованиями к вертикальной апертуре вакуумной камеры в данном месте накопителя, необходимой для свободного пролёта пучка. Эти требования формулируются исходя из соображений хорошего времени жизни электронного пучка и условий инжекции, во время которой размеры, занимаемые пучком в камере максимальны. Кроме того, с точки зрения влияния электронного пучка, приближение вакуумной камеры к медиане увеличивает нагрев стенок вакуумной камеры вигглера токами отражения, тем самым увеличивая тепловую нагрузку на криогенную систему вигглера и увеличивая испарение жидкого гелия. Поэтому выбор оптимального технического решения и способа размещения вакуумной камеры для пролёта пучка внутри межполюсного зазора и величины этого зазора всегда является результатом компромисса между необходимым уровнем поля и технологическими возможностями по изготовления камеры, а так же общей надёжностью и работоспособностью вигглера.

С точки зрения «потребительских» свойств, величину периода λ_0 при фиксированной полной длине вигглера, которая обычно жёстко ограничивается доступным местом в прямолинейном промежутке накопителя, необходимо выбирать из соображений максимальной плотности потока фотонов в необходимом энергетическом диапазоне. При заданных параметрах накопителя, таких как энергия *E*, ток *I* и длина промежутка *L* для постановки вигглера, и определённой энергии квантов излучения ε для получения потока фотонов в требуемом для проведения эксперимента диапазоне, необходимо провести оптимизацию на максимум спектрального потока фотонов таких параметров многополюсного вигглера, как периода λ_0 и максимального поля на полюсе B_p при доступном межполюсном зазоре g. Спектральный поток фотонов, излучаемых электронным пучком с энергией E из области с уровнем магнитного поля B_0 , на данной энергии квантов ε , выражается через универсальную спектральную функцию S(y) [**33**]:

$$S(y) = \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \cdot (y) \cdot \int_{y}^{\infty} K_{5/3}(x) dx = \frac{9^{3}\sqrt{3}}{8\pi} \cdot G_{1}(y) = 0.6202 \cdot G_{1}(y),$$
(2.13)

где $G_1(y)$ – другая запись универсальной спектральной функции:

$$G_1(y) = (y) \cdot \int_y^\infty K_{5/3}(x) dx, \qquad (2.14)$$

в которой $K_{5/3}(x)$ – модифицированная функция Бесселя 2 рода (функция Макдональда). При этом S(y) – нормированная функция:

$$\int_{0}^{\infty} S(y)dy = 1 \tag{2.15}$$

Параметр $y = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} = \frac{\lambda_c}{\lambda}$ – отношение между данными энергиями квантов ε и длинами волн λ , которые связаны между собой через с = 2.99 · 10⁸ [M/c] – скорость света и $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ [Дж] - постоянную Планка, как:

$$\lambda \left[\text{\AA} \right] = \frac{ch}{\varepsilon} = \frac{12.4}{\varepsilon} \left[\text{KəB} \right]$$
(2.16)

и некоторыми критическими значениями ε_c и λ_c , характеризующими спектр излучения. Физический смысл этих критических параметров заключается в том, что они делят полную спектральную мощность на две равные части. На Рисунке 11 показана форма универсальной спектральной функции $G_1(y)$.



Рисунок 11. Универсальная спектральная функция синхротронного излучения.

Критическая длина волны выражается через величину магнитного поля *B*₀ на орбите и энергию электронов *E* следующей практической формулой [**4**]:

$$\lambda_c[\text{Å}] = \frac{186.4}{B_0[\kappa\Gamma c] \cdot E [\Gamma \Im B]^2}$$
(2.17)

Воспользуемся выражениями (2.17) для длины волны и (2.10), связывающим поле B_0 на орбите с максимальным полем B_p на сверхпроводящей обмотке, и учтём, что количество полюсов укладывающихся на общей длине магнитной структуры (и, соответственно, пропорционально увеличивающих общий поток фотонов), определяется как $(L/\lambda_0) \cdot 2$, преобразуем выражение (2.13) для спектрального потока из одного полюса применительно к многополюсным сверхпроводящим вигглерам, в зависимости от периода λ_0 и поля на обмотке B_p :

$$F(\lambda_0, B_p) = \frac{L \cdot 2}{\lambda_0} \cdot S\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) = \frac{L}{\lambda_0} \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \left(\frac{186.4}{\left(\frac{B_p}{\cosh\left(\frac{\pi_0}{\lambda_0}\right)}\right) \cdot E^2} \frac{1}{\lambda}\right) \int_{\lambda_c/\lambda}^{\infty} K_{5/3}\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right) d\left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)$$
(2.18)

При этом для учёта реально доступного пространства для размещения многополюсной магнитной структуры необходимо также зарезервировать место и для дополнительных корректирующих боковых полюсов с меньшим уровнем поля, предназначенных для замыкания орбиты пучка.

Исследование поведения функции (2.18) показывает, что:

1. При уменьшении периода поле на орбите быстро спадает и поток фотонов падает;

2. При увеличении периода поле на орбите возрастает, и поток проходит через максимум, однако затем опять падает, благодаря уменьшению числа полюсов;

3. Увеличение поля на полюсе позволяет уменьшать период и увеличивать плотность потока фотонов;

Можно отметить, что при низких энергиях фотонов выгоднее увеличивать число полюсов, чем величину поля, а для больших энергий требуется максимально возможное поле, что оправдывает использование сверхпроводимости.

Что касается области применения функции (2.12), то необходимо также учитывать, что в этом выражении предполагается, что увеличивая период и раздвигая полюса вдоль орбиты пучка, полюса остаются неизменными по форме обмотки и числу витков в ней. На самом деле, при раздвижке катушек образующееся между ними пространство логично заполнять дополнительными витками провода, либо корректировать размер самого железного керна. Поэтому точные данные по распределению магнитного поля в зазоре и на обмотке можно получить только после расчётов на трёхмерных программах.

Существуют также и дополнительные факторы, которые могут повлиять на выбор основных параметров вигглера (величины поля и периода), которые нужно принимать в расчёт при проектировании многополюсного вигглера в реальных условиях конкретного накопителя:

1. Зачастую возникают ограничения по максимальному полю и числу полюсов по величине общей мощности и плотности излучения, которые должны соответствовать оборудованию канала вывода излучения. Особенно это важно учитывать для высокого уровня поля и энергии пучка. Например, для источника СИ ESRF максимальная разрешённая мощность, которая может принять абсорбер

излучения, составляет 15 кВт и даже одно устройство длиной 1.6 м с полем около 1.5 Тл может превысить это ограничение [**34**]. Поэтому вставные устройства с большим полем должны быть ограничены по длине. Показательный пример последствий того, как не была учтена реальная мощность излучения, генерируемая многополюсным сверхпроводящим вигглером, показан на Рисунке 12, на котором представлен результат разрушения приёмника излучения на Австралийском синхротроне, произошедший при первом же включении в рабочем режиме 63полюсного вигглера, созданного в ИЯФ СО РАН, с полем 4.2 Тл и периодом 52 мм.



Рисунок 12. Приёмник излучения на AS (Australian Synchrotron), расплавленный при включении 63-полюсного вигглера с полем 4.2 Тл.

2. Особые требования могут накладываться и по углу раствора излучения по горизонтали. Например, маленький горизонтальный угол раствора может потребоваться для ограничения плотности мощности, падающей на стенки на выходном участке вакуумной камеры или, наоборот, может возникать требование иметь большой горизонтальный угол, который позволил бы расположить несколько станций вывода излучения на одном вигглере.

3. При большой генерируемой мощности из вигглера возникает также ограничение по мощности ускоряющего резонатора, который может не справится с

компенсацией большого уровня мощности, величина которой может быть сравнима с общей мощностью излучения, теряемой на всех поворотных магнитах накопителя. Так, например, при установке 21-полюсного вигглера с полем 7.5 Тл на накопитель Сибирь-2 (КИСИ, Москва), энергия, пучка теряемая на 1 оборот возросла с 0.685 МэВ (от поворотных магнитов) до 1.045 МэВ и амплитуда напряжения резонаторе пришлось повысить с 1.2 МВ до 1.61 МВ [**135**].

Очевидным преимуществом сверхпроводящих технологий, применительно именно к многополюсным вигглерам, является возможность значительно, по сравнению с постоянными магнитами и обычными тёплыми электромагнитами, увеличивать величину поля B_p в сверхпроводящих обмотках при определенном зазоре g, не увеличивая при этом длину периода λ_0 . Таким образом, появляется возможность на заданной длине прямолинейного промежутка L разместить большее количество периодов, не уменьшая, а значительно увеличивая уровень поля B_0 на орбите пучка. Это дает преимущество одновременно как по сдвигу спектра излучения в коротковолновую область, так и по увеличению потока излучаемых фотонов. Поэтому достижение максимально возможной величины поля B_p на обмотке сверхпроводящего полюса является основной задачей при разработке вставного устройства. Для достижения сверхпроводящего многополюсного максимального поля необходимо провести оптимизацию геометрии обмоток и таким образом, чтобы максимально распределения плотности тока на них эффективно использовать токовые характеристики выбранного сверхпроводящего провода, не допуская преждевременного выхода на критический режим по величине тока в самых напряжённых по полю областях обмотки. Основную сложность при этом представляет правильный учёт нелинейных эффектов насыщения железа, так как при росте уровня поля все более дальние от сверхпроводящей обмотки области железа переходят в насыщенное состояние. Поэтому особенностью расчётов сверхпроводящих магнитных систем является учёт того, что часть железа полюсов и магнитопровода практически всегда находится в насыщенном состоянии, в то время как при расчёте обычных «тёплых» электромагнитов, наоборот, стараются не превышать уровень поля, с которого начинается насыщение железа, так как это

позволяет не учитывать нелинейные эффекты в зависимости поля от тока в обмотках.

Ещё одной особенностью является то, что, в отличие от обычных магнитов, где геометрия магнитного поля формируется точностью изготовления самого железа, в сверхпроводящих магнитах, где железный сердечник является насыщенным, на первый план выходит точность укладки витков обмотки. Это накладывает особо жёсткие ограничения на технологию изготовления таких обмоток. Нужно отметить также, что, даже для вигглеров с относительно невысоким уровнем поля на орбите (2 – 2.5 Тл), небольшая величина поля в критических точках сверхпроводящей обмотки компенсируется высоким уровнем тока. Вообще говоря, величина поля на обмотке всегда должна находиться как можно ближе к своим критическим параметрам, так как это, по сути, и является мерой эффективности правильно магнитной системы и спроектированной «нагруженности» выбранного сверхпроводящего провода.

2.2. Выбор сверхпроводящего провода

Состояние сверхпроводника с плотностью тока J[A/мм²], находящегося в магнитном поле В[Тл] при криогенных температурах Т[К], можно описать некоторой критической поверхностью в координатах J, B, T, представленной на Рисунке 13. Сверхпроводящему состоянию соответствуют точки, находящиеся ниже критической поверхности. Если же какой либо из этих параметров превысит соответствующее критическое для него значение и точка, описывающая состояние, окажется выше этой поверхности, то происходит переход сверхпроводника в состояние нормальной проводимости. В настоящее время промышленностью производятся несколько типов сверхпроводящих проводов: Nb-Ti, Nb₃Sn и ВТСП (высокотемпературные сверхпроводники). Однако реально широко используются производства сверхпроводящих магнитов первые для только два типа сверхпроводящих материалов, оба принадлежащих к сверхпроводникам второго рода.



Рисунок 13. Критическая поверхность в координатах магнитного поля В, температуры Т, и плотности тока J для Nb-Ti сверхпроводников.

2.2.1 Свойства NbTi сверхпроводников

Наиболее технологичными являются провода на основе сплава Nb-Ti, имеющего хорошие механические свойства, производство которого хорошо освоено. Такие провода, состоящие из большого количества Nb-Ti нитей в медной матрице, довольно пластичны и хорошо стабилизированы. Верхний критический предел по величине магнитной индукции, при которой ещё сохраняется сверхпроводящее состояние для Nb-Ti в зависимости от температуры можно описать формулой [**35**]:

$$B_{C0}(T) = B_{C20} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{C0}} \right)^{1.7} \right],$$
(2.19)

где B_{C20} - верхний предел магнитной индукции при «нулевой» температуре (~14.5Tл), а T_{C0} - верхняя критическая температура при «нулевом» магнитном поле (~9.2K).

Обычно сверхпроводящие магниты работают при температуре кипения жидкого гелия при атмосферном давлении T = 4.2K. Следовательно, в таких условиях величина максимального магнитного поля в сплаве Nb-Ti не может превышать $B_{C0}(4.2) = 10.6T_{\pi}$. Возможна так же работа при переохлаждённом жидком гелии и пониженном давлении газа (T = 1.8K). В этом случае величина критического поля повышается до $B_{C0}(1.8) = 13.6T_{\pi}$. Однако, долговременное использование такого режима не очень удобно из-за усложнения криогенного оборудования и повышенного расхода жидкого гелия.

С другой стороны, наличие сверхпроводящего состояние будет сохраняться в Nb-Ti только при температуре ниже некоторой критической, которая в зависимости от величины магнитного поля имеет вид:

$$T_{C}(B) = T_{C0} \left(1 - \frac{B}{B_{C20}} \right)^{1.7}$$
(2.20)

Если величина магнитной индукции на сверхпроводящей обмотке достигает, например, 8 Тл, то критическая температура составит $T_c(8) = 6.8K$, то есть нагрев обмотки всего на 2.6 К выведет её из сверхпроводящего состояния.

Критическую плотность тока можно выразить как функцию температуры, магнитной индукции и некоторой критической плотности тока при 4.2 К и поле 5Тл J_{cref} [36]:

$$\frac{J_{C}(B,T)}{J_{Cref}} = \frac{C_{0}}{B} \left[\frac{B}{B_{C2}(T)} \right]^{\alpha} \left[1 - \frac{B}{B_{C2}(T)} \right]^{\beta} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{C0}} \right)^{1.7} \right]^{\gamma}, \qquad (2.21)$$

где C_0 , α , β и γ являются подгоночными параметрами, типичными значениями которых являются: $C_0 = 30 T \pi$, $\alpha = 0.6$, $\beta = 1.0$ и $\gamma = 2.0$. Типичное значение плотности критического тока (без меди), который в настоящее время получен на промышленно изготавливаемых образцах составляет >2700 А/мм² в поле 5Tл [**37**, **38**]. Критическое поле и температура определяется химическим составом

сверхпроводящего материала, а критическая плотность тока – микроструктурой и технологией изготовления. В результате развития технологии, значения критических плотностей тока Nb-Ti сплавов непрерывно увеличиваются, но критические поля и температуры остаются более или менее стабильными. Структурными элементами, отвечающими за высокие критические токи являются центры пиннинга, на которых крепятся магнитные вихри. Роль центров пиннинга в частицы несверхпроводящей α-фазы титана распределённые в β-Nb-Ti играют матрице ниобия. От объёмной доли частиц α-фазы зависит критическая плотность тока в проводе и увеличению её способствует многократная деформация сплава при получении тонкой проволоки из массивного слитка сплава. Прогресс в увеличении критической плотности тока идёт в направлении совершенствования технологии вытяжки слитка в проволоку, так как при увеличении деформации идёт нарастание критического тока в NbTi-сплаве, но при превышении до некоторой степени деформации в сплаве наряду с частицами α-фазы появляются частицы несверхпроводящей ω-фазы, которые на величину критической плотности тока и прочностные характеристики провода влияют неоднозначно. При минимальной ω-фазы eë концентрации частицы могут повысить плотность тока как дополнительные центры пиннинга, а при больших концентрациях приводят к повышению хрупкости и потере пластично сплава. Соответственно современное развитие идёт в отработке таких тонких технологических моментов, как степень допустимой вытяжки, температурный и временной режим промежуточных отжигов для снятия напряжений [39].

На Рисунке 14 представлена зависимость критического поля от тока для NbTi провода диаметром 0.85 мм при различных температурах. На Рисунке 15 приведено изотермическое сечение критической поверхности для Nb-Ti при 4.2K. Максимальная величина магнитного поля, полученного на Nb-Ti проводе при температуре 1.77 К равна 10.53 Тл [**35**].



Рисунок 14. Зависимость критического поля от тока для NbTi/Cu провода диаметром 0.85 мм при разных температурах.

Рисунок 15. Изотермическое сечение критической поверхности для Nb-Ti и Nb3Sn при 4.2K. (А - обычный рабочий диапазон существующих электромагнитов.

2.2.2 Свойства Nb₃Sn сверхпроводников

Для получения магнитных полей, превышающих 10.5 Тл, необходимо использовать сверхпроводящий провод на основе интерметаллического соединения критические параметры которого так же показаны на Рисунке Nb₃Sn, 15. У соединения Nb₃Sn имеются очевидные преимущества перед Nb-Ti как по величине плотности тока, так и по магнитному полю. Кроме этого, критическая температура (когда критическая плотность тока стремится к нулю при нулевом поле) существенно выше у Nb₃Sn (18.3 К), чем для Nb-Ti (9.2 К). Максимальное поле, которое было получено в дипольном магните с Nb₃Sn обмотками, составляет 13.5 Тл при температуре 1.8 К [40]. Несмотря на эти преимущества, соединение Nb₃Sn используется значительно реже, чем Nb-Ti, вследствие своих механических свойств. Nb₃Sn – хрупкое интерметаллическое соединение, которое разрушается при деформации растяжением 0.2-0.5%. К тому же при изготовлении обмоток из Nb₃Sn

53

требуется термическая обработка при температуре ~700 С° в течение 300 часов в вакууме или инертном газе. Трудности работы с таким хрупким материалом приводят к тому, что его рационально использовать только для получения экстремально высоких магнитных полей величиной более 10.5 Тл.

Наибольшую критическую плотность магнитного потока B_{C2} , можно представить как функцию температуры, T и деформации ε [41]:

$$\frac{B_{C2}(T,\varepsilon)}{B_{C20}(\varepsilon)} = \left[1 - \left(\frac{T}{T_{C0}(\varepsilon)}\right)^2\right] \cdot \left\{1 - 0.31 \cdot \left(\frac{T}{T_{C0}(\varepsilon)}\right)^2 \cdot \left[1 - 1.77 \ln\left(\frac{T}{T_{C0}(\varepsilon)}\right)\right]\right\},\tag{2.22}$$

где B_{C20} - критическая плотность магнитного потока при нулевой температуре: $B_{C20}(\varepsilon) = B_{C20m} \cdot \left(1 - a \cdot |\varepsilon|^{1.7}\right)$

и T_{c0} - критическая температура при нуле потока магнитного поля:

$$T_{C0}(\varepsilon) = T_{C0m} \cdot \left(1 - a \cdot |\varepsilon|^{1.7}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Здесь, а – параметр равный 900 при деформации сжатия и 1250 для деформации растяжения, B_{C20m} - критическая плотность магнитного потока при нулевой температуре и нулевой деформации, T_{C0m} - критическая температура при нулевом магнитном потоке и нуле деформации, Для бинарных компаундов T_{C0m} и B_{C20m} могут быть взяты равными 16 К и 24 Тесла, а для тройных компаундов 18 К и 28 Тесла соответственно [**35**]. Критическая плотность тока может быть представлена как функция температуры *T*, плотности магнитного потока *B*, и деформации ε [**41**]:

$$J_{C}(B,T,\varepsilon) = \frac{C_{0}}{\sqrt{B}} \cdot \left(1 - a \cdot \left|\varepsilon\right|^{1.7}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 - \frac{B}{B_{C2}(T,\varepsilon)}\right]^{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_{C0}(\varepsilon)}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(2.23)

Величина критической плотности тока составляет – 750 А/мм² при 4.2К и 12 Тл с эффективным диаметром жил 15-20 мкм. Такие значения соответствуют $C_{0,}$ равным порядка *12 000 А*· $Tn^{1/2}/mm^2$.

Несмотря на то, что по своим физическим и технологическим характеристикам Nb₃Sn сверхпроводники не оптимальны для изготовления именно

многополюсных вигглеров, в ИЯФ СО РАН, тем не менее, имеется большой опыт использования Nb₃Sn для изготовления сверхпроводящих вставных устройств. Без использования Nb₃Sn на внутренней секции обмотки, где уровень поля превышает 9 Тл, невозможно было бы получить более высокие магнитные поля. Так, например, Nb₃Sn секции были использованы нами при создании трёхполюсного шифтера с рекордной величиной магнитного поля 10.3 Тл для источника медленных позитронов на накопителе SPRING-8 в Японии [99, 119]. Nb₃Sn секции были использованы также при создании прототипа поворотного магнита Superbend c уровнем поля 9.3 Тл для источника синхротронного излучения BESSY-II [123, 124, 125]. Можно отметить, что уровни магнитного поля, достигнутые на этих устройствах до сих пор остаются рекордными и ещё никем не были превышены для такого рода устройств. Внешний вид сверхпроводящих обмоток 10.3 Тл шифтера и 9.3 Тл магнита Superbend, внутренние секции которых изготовлены из Nb₃Sn проводника, представлены на Рисунке 16 и Рисунке 17.



Рисунок 16. Сверхпроводящий полюс шифтера с полем 10.3 Тл для накопителя Spring-8. Внутренняя секция изготовлена из Nb₃Sn проводника.

Рисунок 17. Сверхпроводящие катушки с использованием Nb₃Sn провода для диполя Superbend с полем 9.3 Тл для накопителя BESSY-II.

2.2.3 Анализ возможности использования ВТСП сверхпроводника

В настоящее время наблюдается значительный прогресс в разработке сверхпроводников на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Однако использование ВТСП лент на основе сверхпроводника второго поколения производстве сверхпроводящих многополюсных магнитных систем для при генерации синхротронного излучения, таких как вигглеры и тем более, ондуляторы такими же параметрами, которые достигнуты при использовании с низкотемпературных сверхпроводников NbTi/Cu, в настоящее время является, скорее всего, ещё неоправданным по следующим причинам:

1. При изготовлении вигтлеров с характерной величиной периода менее 50 мм состоящих из полюсов, имеющих форму горизонтального рэйстрека (от англ. "racetrack" – беговая дорожка) и, соответственно, продольным размером менее 25мм, сверхпроводящий провод должен наматываться на железный сердечник с радиусом кривизны менее 6 мм. Однако выпускаемая в настоящее время ВТСП лента практически полностью теряет свои сверхпроводящие свойства при радиусе изгиба уже менее 7 мм, что легко заметить из графика, приведённого на Рисунке 18.



Рисунок 18. Зависимость деградации токонесущей способности ВТСП ленты от деформации, определяемой изгибом.

2. Процесс изготовления многослойной обмотки на железном сердечнике в форме горизонтального рэйстрека с помощью ленты имеет технические сложности, связанные с выводом внутреннего витка и с переходом со слоя на слой. К тому же чисто геометрически невозможно изготовить многосекционную обмотку, для которой подходит только круглый или прямоугольный провод. С другой стороны, возможно изготовление вертикальной обмотки в форме вертикального рэйстрека в виде «блина». Однако при этом возникают технические сложности, связанные с многочисленными соединениями внутри обмотки, что приведёт к дополнительному выделению тепла. Опять же, для такого типа обмотки невозможно сделать двухсекционную катушку, дающую выигрыш по величине поля ~ 15% (как это будет показано в Главе 3.1.1).

3. Сверхпроводящий многополюсный вигглер состоит из большого числа обмоток, которые должны соединяться между собой с помощью контактов, имеющих малое сопротивление. На сегодняшний день имеется технология для соединения сверхпроводника на основе NbTi/Cu, которая успешно используется на всех многополюсных вигглерах, создаваемых в ИЯФ СО РАН, которая надёжно обеспечивает остаточное сопротивление не хуже $10^{-12} - 10^{-13}$ Ом. В тоже время надежного метода для соединений ВТСП лент со схожим сопротивлением контакта пока не известно. Например, в работе [42] приводится типичное значение сопротивления паяных соединений ВТСП, которое составляет в лучшем случае $10^{-7} - 10^{-8}$ Ом. При большом количестве контактов, которое в многополюсном вигглере может доходить до нескольких сотен, такое соединение создаёт при протекании тока с характерной величиной ~1000 А тепловыделение порядка 1-3 Вт. С учётом того, что теплоприток в жидкий гелий, имеющий мощность 1 Вт, вызывает его испарение, равное 1.4 л/ч, такая высокая тепловая нагрузка на криогенную систему не позволит создать криостаты с расходом жидкого гелия, приемлемым для использования на накопителях – источниках синхротронного излучения.

4. Использование ВТСП сверхпроводника оправдано, в большой степени, возможностью его использования при температуре жидкого азота ~77 К. При этом предполагается, что работа при азотных температурах значительно удешевит

криогенного устройства. Однако, судя эксплуатацию такого ПО данным производителя (Superpower) представленным на Рисунке 19 критический ток ВТСП в магнитном поле величиной, например, 5 Тл ленты при этой температуре снижается в ~100 раз по сравнению с током при отсутствии поля. Такая плотность недостаточна для создания вигглера с высоким уровнем поля. Так тока явно средний рабочий ток для ВТСП ленты шириной 4 мм и толщиной ~0.1 мм составляет ~130А в отсутствие поля, что при характерном поле 5 Тл на обмотке и температуре 77 К соответствует максимальному току ~1А, вместо требуемых аналогичных 850А для NbTi/Cu при температуре 4 К.



Рисунок 19. Графики зависимости критического тока ВТСП от уровня магнитного поля для различных температур.

5. При температуре жидкого гелия, как следует из Рисунка 19, критический ток ВТСП увеличивается. Однако для ленты шириной 4 мм этого тока также будет недостаточно, так как он составит всего ~270А вместо требуемых 850А. При том, что стоимость ВТСП ленты за метр примерно в 15-20 раз превышает стоимость NbTi/Cu провода, стоимость материала для производства магнита будет в десятки

раз выше по сравнению с магнитом с такими же параметрами изготовленным из NbTi/Cu. При этом даже не принимались во внимание технологические сложности изготовления обмотки из ленты, а не из круглого провода. Кроме того, вопрос надёжности такой обмотки требует специального изучения с точки зрения деградации обмотки со временем.

Таким образом, можно заключить, что на сегодняшний день использование ВТСП сверхпроводника для изготовления многополюсных вигтлеров все ещё не является оправданным. В настоящее время область применения ВТСП сверхпроводников при создании многополюсных вставных устройств ограничена, скорее всего, только сверхпроводящими токовводами, уменьшающими приток тепла в криостат с жидким гелием.

2.3. Характеристики используемых NbTi/Cu сверхпроводящих проводов

Как можно заключить из сказанного выше (Глава 2.2.1), исходя из характеристик существующих сверхпроводников, для уровня магнитного поля на орбите вставного устройства, соответствующего величине поля на обмотке, не превышающих ~ 8-9 Тл, выгодно использовать провода из Nb-Ti сплава. Но режим его использования по уровню поля на обмотке и плотностям тока будет, вероятно, приближаться к его теоретически возможному пределу. Поэтому во всех, представленных в данной устройствах, были работе сверхпроводящих использованы именно Nb-Ti Таблице 2.1 представлены характеристики некоторых сверхпроводники. В Nb-Ti сверхпроводящих проводов с различными коммерчески доступных параметрами, которые были использованы для изготовления описываемых в данной работе многополюсных сверхпроводящих вигглеров.

	1	2	3	4
Материал	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti
сверхпроводника				
Отношение	1:1.4	1:1	1.4:1	1.4:1
сечения Nb-Ti:Cu				
Диаметр (без	0.85/0.92	0.85/0.92	0.85/0.92	0.5/0.55
изоляции/с				
изоляцией), мм				
Материал	Полиэфир-	Полиэфир-	Полиэфир-	Полиэфирэми
изоляции	эмидный лак	эмидный лак	эмидный лак	дный лак
Количество	8910	-	-	-
сверхпроводящих				
жил				
Критические	360/634(7Тл)	553/975(7Тл)	715/1261(7Тл)	318/1590(6Тл)
параметры:	488/860 (6Тл)	408/720(8Тл)	743/1310(8Тл)	283/1415(7Тл)
ток в проводе, А/	628/1108(5Тл)			158/790(8Тл)
плотность тока в				82/410(9Тл)
сверхпроводнике,				
A/mm^2				

Таблица 2.1. Характеристики используемого сверхпроводящего провода

Выводы к Главе 2:

1. разработана Предложена И методика оптимизации параметров вигглеров требуемых сверхпроводящих многополюсных для получения спектральных и мощностных характеристик синхротронного излучения на основе подбора величины периода и магнитного поля на орбите при определённом магнитном зазоре и одновременном достижении максимально возможного уровня магнитного поля на обмотке, близкого к току короткого образца;

2. Исследованы и выявлены особенности и ограничения для применения такой методики при оптимизации реальной периодической магнитной структуры для использования на конкретном накопителе;

3. Обоснован выбор Nb-Ti сверхпроводника для создания многополюсных сверхпроводящих периодических магнитных структур с величиной поля на обмотке, не превышающих ~ 8-9 Тл.

Глава 3

Магнитная система многополюсных сверхпроводящих вигглеров для генерации синхротронного излучения

В процессе создания описываемых в данной работе многополюсных сверхпроводящих вигглеров, которые в настоящее время успешно работают на многих специализированных источниках СИ во всем мире, были, практически, перекрыты все востребованные пользователями СИ диапазоны по энергиям квантов и другим характеристикам излучения. При этом каждое такое вставное устройство было оптимизировано под свою специфическую пользовательскую задачу с учётом конкретных особенностей данного накопителя и требований к спектру генерируемого излучения. Но, несмотря на все многообразие параметров этих вставных устройств, их можно попытаться систематизировать, условно разделив на три отдельные группы:

Вигглеры с высоким уровнем поля (7–7.5 Тл) и длинным периодом (140 – 200 мм);
 Вигглеры со средним уровнем поля (2.5–4.2 Тл) и средним периодом (46 – 64 мм);
 Вигглеры с малым уровнем поля (2 – 2.1 Тл) и коротким периодом (30 – 34 мм);
 Далее рассмотрим эти три группы вставных устройств подробнее.

3.1. Многополюсные вигглеры с экстремально высоким уровнем поля (7 – 7.5 Тл) и длинным периодом (140 – 200 мм)

Вставные устройства с высоким уровнем поля особенно выгодно использовать на источниках синхротронного излучения с низкой и средней энергией электронов на уровне 1-2.5 ГэВ. В этом случае можно не только увеличить поток фотонов, но и сдвинуть спектр излучения в область высокоэнергетичных квантов и проводить эксперименты, которые ранее были не доступны на источниках с такими параметрами электронного пучка. К тому же высокий уровень магнитного поля и длинный период приводят к тому, что при относительно низкой энергии электронов происходит значительное угловое отклонение электронного пучка и появляется возможность использовать широкий горизонтальный угол излучения для установки сразу нескольких каналов вывода излучения. При этом, однако, нужно учитывать, что может потребоваться довольно широкая апертура вакуумной камеры для вывода пучка излучения, что значительно усложняет конструкцию такого вставного устройства.

Таким образом, используя данные вставные устройства, можно значительно продлить жизненный цикл относительно старых источников СИ, несмотря на то, что излучение из обычных поворотных магнитов уже не удовлетворяет возросшим требованиям и новым пользовательским задачам. В Таблице 3.1 представлены характеристики трёх высоко-полевых вигглеров, созданные в ИЯФ СО РАН для специализированных источников синхротронного излучения BESSY-II (Берлин, Германия), САМD-LSU (Луизиана, США) и Курчатовского Института (Сибирь-2, Москва).

Таблица 3.1. Основные характеристики вигглеров с высоким уровнем поля и длинным периодом, созданных в ИЯФ СО РАН

Источник СИ, Энергия,	BESSY-II, 1.9 ГэВ	Сибирь-2, 2.5 ГэВ	CAMD-LSU, 1.3 ГэВ
публикации	Германия, 2002,	Москва, 2007,	CIIIA, 2013,
	[108, 109, 115,	[52, 155, 157]	[55 54, 55 147,
	118, 121, 122]		148, 151, 152]
Магнитное поле,	7.0 (7.67)	7.5 (7.7)	7.5 (7.75)
В _{рабочее} (В _{макс)} , Тл			
Число полюсов	13 + 4	19 + 2	11+4
(основные + боковые)			
Период, мм	148	164	193.4
Зазор магнитный	19 (13)	19 (14)	25.2 (15)
(для пучка), мм			
Крит. Энергия, КэВ	16.8	31	8.53
Параметр К	~97	~115	~136
Мощность, кВт	56 (1.9 ГэВ, 0.5 А)	36 (2.5 ГэВ, 0.1 А)	17 (1.3 ГэВ, 0.2 А)
Запасённая энергия, кДж	450	500	850

3.1.1. 17 – полюсный вигглер с полем 7 Тл и периодом 148 мм для BESSY-II

На источнике синхротронного излучения BESSY-II с энергией электронов $E = 1.9 \ \Gamma$ эВ соответствующей характеристической энергией И квантов ИЗ поворотных магнитов с полем ~ 2 Тл, которая составляла всего ε_c ~ 5 КэВ, возникла необходимость в проведении экспериментов с потоком фотонов $5 \cdot 10^{12} \frac{\phi \text{отонов}}{ce\kappa \cdot 0.1\%^{\Delta\lambda}/2}$ на энергии фотонов *ε*~60 КэВ. При этом максимальная интенсивность излучения должна была соответствовать энергии фотонов *ε*~14 КэВ. Такой жёсткий спектр излучения потребовался институту HMI (Hahn-Meitner Institute) для исследований по структурной биологии, физике твёрдого тела и для прикладных работ. Для этих целей предполагалось построить два специализированных канала вывода синхротронного излучения для использования методик магнитного рассеяния и изучения остаточных деформаций.

Требуемые характеристики излучения можно было обеспечить, используя не просто сверхпроводящие магнит, а именно многополюсный сверхпроводящий вигглер с высоким уровнем поля, специально оптимизированный на такую задачу. Отметим, что к этому времени на накопителе BESSY-II уже успешно функционировали два трёхполюсных шифтера с уровнем полем 7 Тл, созданных так же в ИЯФ СО РАН [102, 111]. Однако для генерации потока квантов требуемой величины необходимо было использовать как можно больше полюсов с таким же полем, разместив их на доступной свободной длине 2.2 м от фланца до фланца. Выбор максимального уровня поля именно на уровне ~7 Тл определялся тем, что для получения такого поля на орбите пучка (при оптимально подобранных токах) поле на сверхпроводящей обмотке должно составлять ~8 Тл, что, вообще говоря, является теоретическим пределом при использовании Nb-Ti сверхпроводящего провода. Таким образом, для данной конфигурации вставного устройства был выбран уровень поля, предельно возможный для Nb-Ti провода. Для создания более высоких полей необходимо было бы использовать уже Nb₃Sn сверхпроводник, который гораздо сложнее в использовании с технологической точки зрения, так требует длительной термообработки при температуре ~700 С⁰,

после чего становится очень хрупким. Использование Nb₃Sn сверхпроводника является экономически и технологически оправданным только в случае создания сверхвысоких полей. Поэтому во всех описываемых данной работе В сверхпроводящих вигглерах были использованы только Nb-Ti сверхпроводящие провода с различными характеристиками токовыми И диаметрами, оптимизированными под конкретную задачу.

Учитывая то, что вертикальная апертура для пучка должна была быть не менее 13 мм при поставленной задаче получения максимального потока фотонов и, соответственно, минимальном периоде для размещения большего числа полюсов, было принято решение не использовать тёплую вакуумную камеру для пучка, а оставить только гелиевую камеру (стенку гелиевого сосуда) и холодный медный экран для защиты гелия от нагрева пучком, который будем далее называть "лайнер" (от англ. liner – вкладыш, гильза). При этом величина магнитного зазора, при котором обеспечивалось бы размещение такого лайнера внутри холодной камеры с достаточными механическими зазорами, была минимизирована до 19 мм. Особенности конструкции и применения лайнера внутри криостатов для вставных устройств будет подробно рассмотрено в Главе 5. При заданной длине свободного прямолинейного промежутка 2.2 м на этой длине необходимо было разместить, помимо самого магнита, также узлы стыковки криостата с вакуумной камерой накопителя, поэтому длина магнита составила L = 1.2 м. Число основных полюсов зависит от периода вигглера λ_0 как: $N_0(\lambda_0) = \frac{L}{\lambda_0} \cdot 2 - N_{side}$, где N_{side} – количество боковых полюсов, предназначенных для выравнивания орбиты. В данном случае число боковых полюсов было равно четырём, так как использовались две пары полюсов с уровнем поля 1/2 и 3/4 от уровня основного поля. Воспользовавшись для вигглера λ_0 с полем на орбите $B_0 = 7$ Тл оптимизации количества периодов нахождением максимума функции (2.18) для характеристической энергии квантов ε_c :

$$\varepsilon_{c} = 12.4 \cdot \frac{B_{0}E^{2}}{186.4} = 12.4 \cdot \frac{70 \, [\text{Krc}] \cdot 1.9 \, [\Gamma \Rightarrow B]^{2}}{186.4} \approx 16.8 \, [\text{K} \Rightarrow B], \tag{3.1}$$

что соответствует критической длине волны $\lambda_c = \frac{12.4}{\varepsilon_c} = \frac{12.4}{16.8} = 0.74$ [Å], получим зависимость, показанную на Рисунке 20.



Рисунок 20. График функции F(λ_0), пропорциональной потоку фотонов с длиной волны $\lambda_c = 0.74$ Å из вигглера с полем $B_0 = 7$ Тл, в зависимости от периода вигглера λ_0 .

Из графика легко заметить, что максимум функции соответствует периоду ~14.8 см, что соответствует 13 основным и 4 корректирующим полюсам, помещающимся в заданном промежутке. При этом поле в медианной плоскости имеет величину ~ 7 Тл. При уменьшении периода поле B_0 в медианной плоскости снижается и плотность потока падает. При увеличении периода поле в медианной плоскости возрастает, но, при этом уменьшается и количество полюсов N_0 , помещающихся на заданном промежутке и, следовательно, плотность фотонов так же уменьшается. Таким образом, для данного вигглера были выбраны следующие оптимальные параметры: период 148 мм, межполюсной зазор 19 мм и поле в медианной плоскости – 7 Тл. Учитывая, что этот уровень поля должен быть рабочим, реальная величина поля должна иметь некоторый запас, который был выбран на уровне 7.2 Тл. На Рисунке 21 показано продольное сечение вигглера, показывающее размещение основных и корректирующих обмоток, а на Рисунке 22 представлена конструкция магнитной системы вигглера (вид сверху, верхняя половинка скрыта).



Рисунок 21. Конфигурация обмоток 17-полюсного 7 Тл вигглера для BESSY-II (продольное сечение).



Рисунок 22. Конструкция магнитной системы 17-полюсного 7 Тл вигглера для BESSY-II (вид сверху, верхняя половинка скрыта).

На Рисунке 23 для сравнения приведены плотность потоков квантов излучения для диапазона энергий от 0.1 до 100 КэВ для трёх различных вставных устройств, генерирующих синхротронное излучение на источнике BESSY-II: 40-полюсного 2 Тл ондулятора на постоянных магнитах, трёхполюсного 7 Тл шифтера, созданного в 2000 году в ИЯФ СО РАН и описываемого здесь 17-полюсного 7 Тл вигглера. Для наглядности здесь же показана рабочая точка с соответствующим потоком фотонов на энергии $\varepsilon_c \approx 60$ КэВ, требуемым для вышеописанных исследований, откуда видно, что поток вырос на 10^3 по сравнению с ондулятором и на 10^1 по сравнению с шифтером. Очевидно, что получение требуемого потока фотонов на

энергии $\varepsilon_c \sim 60$ КэВ было возможно только при использовании оптимизированного на требуемые параметры многополюсного вигглера.



Рисунок 23. Спектральный поток фотонов в апертуре 10x10 мм² на расстоянии 10 м от 7 Тл 17-полюсного вигглера (MPW) по сравнению с 7 Тл шифтером (WLS) и 40полюсным 2T ондулятором на постоянных магнитах (W160), работающих на BESSY-II.

Следует отметить, что разработка конструкции канала вывода излучения из вигглера сама по себе является довольно сложной инженерной задачей. Так, несмотря на то, что излучение данного вигглера выводится в два канала, однако при полной мощности генерируемого излечения 56 кВт в эти каналы выводится только 3 кВт и 9 кВт, соответственно. Остальная же мощность, величиной 44 кВт должна быть поглощена специальными водоохлаждаемыми абсорберами, распределёнными вдоль вакуумной камеры накопителя. Так, на Рисунке 24, представленном в работе [43], показано распределение мощности излучения из вигглера по горизонтальному углу ± 26 мрад, из которого можно заключить, что для поглощения паразитной мощности используются 6 абсорберов излучения общей мощностью 44 кВт. На Рисунке 25 показан внешний вид одного из абсорберов, расположенных вдоль вакуумной камеры пучка на выходе из вигглера.



Рисунок 24. Горизонтальное распределение мощности излучения из 7 Тл 17-полюсного вигглера на энергии 1.9 ГэВ и токе 500 мА (полная мощность 56 кВт). Показаны два канала вывода излучения (3 кВт и 9 кВт) и расположение абсорберов, поглощающих оставшиеся 44 кВт.



Рисунок 25. Внешний вид водоохлаждаемого приёмника излучения на выходе 17-полюсного 7 Тл вигглера на накопителе BESSY-II.

3.1.1.1. Конструкция центрального полюса

Основной задачей при разработке данного вигглера с точки зрения магнитной системы стало создание ключевого элемента - сверхпроводящего полюса, способного создать на орбите пучка магнитное поле с амплитудой не менее 7 Тл при требуемом межполюсном зазоре 19 мм и длиной 74 мм, равной половине периода. Если обратиться к Таблице 1.3, где приведены параметры нескольких аналогичных устройств, работающих на различных источниках СИ, то можно сделать вывод, что не только в 2003 году, но и по настоящее время таких параметров ещё нигде в мире продемонстрировано не было. При проектировании центрального полюса, кроме непосредственно получения необходимого уровня поля, также стояла задача удовлетворить требованиям по форме и однородности магнитного поля, которые непосредственно влияют на динамику пучка в накопителе. В связи с этим были сформулированы следующие критерии:

1. Для увеличения уровня поля за счёт использования намагниченности железа обмотка должна быть намотана на сердечник из магнитомягкого железа, которое в насыщенном состоянии добавляет поле ~2 Тл;

2. Железный керн должен иметь форму типа горизонтальный рейстрек, представляющий собой две полуокружности, соединённые между собой двумя Такая форма позволяет обеспечить параллельными прямыми. требуемую поперечную однородность поля. Поле в поперечном направлении в идеале должно быть двумерным, чтобы не проявлялась сектупольная компонента, которая приводит уменьшению динамической апертуры и зависимости частот бетатронных к колебаний от смещения пучка в горизонтальном направлении. В принципе, для выравнивания поперечной однородности поля в требуемой области можно было бы использовать и шиммирование, как это было описано в работе [44]. Однако использование железных шиммируюших пластин для коррекции поперечного распределения поля позволяет выровнять поперечную однородность только на каком-то одном (обычно, максимальном) уровне магнитного поля из-за эффектов насыщения, в то время как поле должно быть однородным на всем диапазоне, чтобы минимизировать влияния на электронный пучок. Поэтому, в данном случае, однородность предполагалось обеспечить, увеличив до необходимых размеров поперечный размер самого полюса;

3. Ширина железного керна также должна учитывать размещение в межполюсном зазоре вакуумной камеры для пролёта пучка, которая по расчётам траектории пучка в вигглере должна по условиям засветки собственным синхротронным излучением из вигглера иметь размер не менее 110 мм. Учитывая то, что верхние и нижние обмотки вигглера притягиваются между собой при включении поля, технологически удобным конструктивным решением является использование дистанцирующих удерживающих проставок из немагнитного материала между верхними и нижними обмотками, расположенных вдоль всей магнитной структуры за габаритами вакуумной камеры. При этом было разумно опирать на эти проставки не поверхности самих сверхпроводящих обмоток, а края железного сердечника, что также увеличивает его необходимый поперечный размер. Таким образом, предварительный поперечный размер железного сердечника составил ~164 мм. Более точный габарит можно было определить только после проведения трёхмерных расчётов, учитывающих конечность поперечного размера обмотки;

Для максимально эффективного использования токонесущей способности сверхпроводящего провода выгодно разбивать сверхпроводящие обмотки на отдельные секции и запитывать их токами разной величины. Ввиду того, что по мере удаления от центра катушки поле в витках провода снижается, появляется возможность запитывать слои, расположенные дальше от центра большим током, соответствующим критическим параметра выбранного провода. Соответственно, увеличивается и общий вклад всех витков обмотки в поле на орбите. Следовательно, выгодно разбивать слои обмотки на несколько секций и запитывать их током разной величины (в идеале, каждый слой – своим оптимальным током). Такого же эффекта можно добиться, используя в разных секциях провод разного диаметра (и, соответственно, с разной токонесущей способностью, пропорциональной сечению провода) и запитывая такую катушку одним током. Однако, чисто конструктивно, использование проводов с разными диаметрами на одной обмотке довольно затруднительно. Вообще говоря, при изготовлении сверхпроводящих магнитов большого (например, соленоидов), размера секционирование возникает естественным образом, так как производимые промышленностью провода имеют технологически ограниченную длину и часто приходится использовать соединять несколько таких проводников, соединяя их контактами снаружи обмотки.

Воспользуемся зависимостью отношения прироста поля ΔB за счет секционирования обмоток к полю односекционной обмотки B_1 от числа секций K в обмотке соленоида, приведенной в работе [45]:

$$\frac{\Delta B}{B_1} = \frac{B_K - B_1}{B_1} = \frac{1}{m \cdot N} - \frac{1}{m \cdot N \cdot \left(1 + \frac{m \cdot N}{K}\right)^K} - \frac{1}{\left(1 + \frac{m \cdot N}{K}\right)^K} , \qquad (3.2)$$

где $m [A/T_{J}]$ – коэффициент пропорциональности в упрощенной (линейной) зависимости критического тока в проводе от поля: $I = I_0 - m \cdot B (I_0 - \text{максимальный})$

ток в отсутствие поля), а N [Тл/А] - коэффициент пропорциональности между током соленоида I и полем B, создаваемым этим током: $N = \frac{B}{I}$.

Тогда для случая максимального прироста поля, когда каждый слой обмотки соленоида запитывается собственным оптимальным током (количество секций $K \to \infty$), можно записать:

$$\frac{\Delta B_{\infty}}{B_1} = \frac{B_{\infty} - B_1}{B_1} = \frac{1}{m \cdot N} - \frac{1}{m \cdot N \cdot e^{m \cdot N}} - \frac{1}{e^{m \cdot N}}$$
(3.3)

На Рисунке 26 представлены зависимости прироста магнитного поля $\frac{\Delta B}{B_1}$, создаваемого соленоидом от произведения $m \cdot N$ при различных количествах секций соленоида K, из которого можно заключить, что наибольший прирост поля (~13%) даёт переход от одной секции к двум, разбиение на 3 секции добавляет ещё ~4% и с каждой следующей добавляемой секцией эффективность прироста снижается.



Рисунок 26. Зависимость прироста поля Δ*B*/*B*₁ от произведения m·N для круглого соленоида с разным числом секций К (*B*₁ − поле соленоида при K=1).

Таким образом, так как разбиение соленоида даже на 2 секции уже даёт достаточно большой выигрыш, то и обмотки многополюсных вигглеров было бы оптимально разбивать, по крайней мере, на две секции с разными токами. В тоже время, дальнейшее увеличение секций будет уже значительно усложнять конструкцию:

1. Потребуется разместить большее количество выводов с каждой секции обмотки на ограниченном, в отличие от круглого соленоида, пространстве обмотки в форме "racetrack";

2. Потребуются дополнительные токовые вводы, увеличивающие приток тепла в жидкий гелий и источники питания, удорожающие стоимость установки в целом.

Поэтому дальнейшее увеличение количества запитывающих токов становится уже избыточным.

Расчёты магнитного поля проводились с использованием трёхмерной программы MERMAID [46], разработанной в ИЯФ СО РАН. Программа MERMAID (MEsh-oriented Routine for MAgnet Interactive Design) использует для решения задач магнитостатики метод конечных элементов. Сечение магнита разбивается на малые элементы так, чтобы каждый элемент области принадлежал с свойствами: железному определёнными ярму, токовой шине или зазору. При этом можно вводить воздушному несколько различных кривых намагниченности для разных сортов железа. В процессе расчёта была окончательно определена форма железного сердечника с размерами 29 х 164 мм и количество витков в слое, а также число слоёв в наружной и внутренней секциях обмотки. Число витков в слое составило 57, а оптимальное число слоёв во внутренней и составило 13. На Рисунке 27 представлена окончательная наружной секциях конструкция центрального полюса, а на Рисунке 28 показано поперечное сечение полной магнитной системы вигглера. На Рисунке 29 представлено распределение силовых линий магнитного поля в поперечном сечении магнита, рассчитанное программой MERMAID.




Рисунок 27. Конструкция двухсекционного центрального полюса 17-полюсного 7 Тл вигглера.

Рисунок 28. Поперечное сечение магнитной системы с вакуумной камерой и медным лайнером.

Для изготовления центрального полюса был выбран сверхпроводящий провод диаметром 0.92 мм с учётом лаковой изоляции, который имеет токонесущую способность 380 А в магнитном поле 7 Тл. На Рисунке 30 показано расчётное расположение рабочих точек, характеризующих состояние сверхпроводящего провода во внутренней и наружной секциях центрального полюса, относительно критической кривой используемого провода. Как видно из графика, токи, соответствующие характеристикам короткого образца используемого провода, составляют 188 А в поле 8.6 Тл для внутренней секции и 472 А в поле 6.3 Тл для наружной секции, соответственно. При таких токах на обмотках пик поля в медианной плоскости составляет 7.57 Т. Это примерно на 5% выше требуемого уровня поля 7.2 Тл. Планировать такой небольшой по величине запас было довольно рискованно, так как на реальной катушке, в отличие от короткого образца, присутствует множество факторов, приводящих к преждевременному выходу провода ИЗ сверхпроводящего состояния. Реальный запас определяется механическим качеством намотанной катушки и зависит от плотности упаковки витков, правильно выбранного наполнителя и компаунда и других факторов.

73





Рисунок 30. Нагрузочная кривая использованного провода и рабочие точки внутренней и наружной секций, соответствующие уровню поля 7.57 Тл и 7 Тл в медианной плоскости.

Рисунок 29. Силовые линии магнитного поля в поперечном сечении магнита (из программы MERMAID).

Рыхлая обмотка подвержена преждевременной потере сверхпроводимости. Однако предыдущий опыт показывал, что при изготовлении сверхпроводящих шифтеров в ИЯФ СО РАН, удавалось достигать уровня поля, составляющего 90-95% от характеристик короткого образца используемого провода. Практический выигрыш от такого подхода состоит в том, что, несмотря на некоторый технический риск от предельного «выжимания» параметров, при минимизации размеров обмотки достигается меньший период магнитной структуры и размещается большее число полюсов и, следовательно, возрастает интегральный поток излучения из такого вставного устройства. Поэтому было сделано предположение, что поскольку число слоёв проектируемой обмотки невелико, по сравнению с полюсом трёхполюсного шифтера, то при хорошо продуманной системе бандажирования катушек удастся достичь поля, равного 95 % критического поля.

Что касается выполнения требований по поперечной однородности поля, то на Рисунке 31 приведено расчётное поперечное распределение поля в медианной

74

плоскости центрального полюса вигглера, из которого можно заметить, что однородность поля не хуже 0.036 % на ширине ± 10 мм.



Рисунок 31. Расчётное поперечное распределение поля в медианной плоскости центрального полюса вигглера. Однородность поля не хуже 0.036% на ширине ±10 мм.

Отсюда можно оценить расчётную максимальную величину секступольной компоненты на каждом полюсе, которая входит в поперечное разложение поля как:

$$B = B_0 + \frac{s}{2} \cdot x^2, \tag{3.4}$$

где *B*₀ – максимальное поле в центре полюса, *S* – секступольная компонента и *x* – поперечная координата. Тогда относительные поперечный спад поля будет равен:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{B - B_0}{B_0} = \frac{1}{B_0} \frac{S}{2} x^2$$
(3.5)

и для максимального поля $B_0 = 7$ Tл:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{1}{7 \, [\text{T}\pi]} \frac{S[\text{T}\pi/\text{M}^2]}{2} (0.01 \, [\text{M}])^2 \le 3.6 \cdot 10^{-4}$$
(3.6)

и расчётная величина секступольной компоненты составит:

$$S \le 50[\mathrm{T}\pi/\mathrm{M}^2] \tag{3.7}$$

На Рисунке 32 приведены результаты измерения секступольной компоненты поля в этом вигглере после изготовления, проведённые с помощью пяти поперечно расположенных датчиков Холла, откуда можно заметить, что расчётная оценка однородности поля не превышает ~50 Тл/м², что хорошо согласуется с результатами расчётов.



Рисунок 32. Измеренная секступольная компонента в поперечном развале 17полюсного вигглера на поле 7 Тл.

3.1.1.2. Прототип многополюсного вигглера

Для проверки правильности расчётов было изготовлено несколько коротких прототипов. Первый прототип был намотан из Nb-Ti провода прямоугольного сечения размером 1.7x0.9 мм². Предполагалось, что такая форма провода увеличит плотность тока в данном сечении обмотки, благодаря лучшему коэффициенту заполнения. Данный провод был прокатан в прямоугольный из обычного круглого оказалось, что изоляция этого конкретного образца сверхпроводника. Однако, провода оказалась недостаточно прочной, так как, скорее всего, была повреждена в процессе прокатки благодаря несовершенству технологии. Поэтому многие обмотки оказались электрически закорочены. Кроме того выяснилось, что намотка прямоугольного провода имеет свои технологические особенности, так как в местах перехода со слоя на слой, часто возникали электрические закоротки на острых краях прямоугольного провода. Так как с этой технологической проблемой справиться не удалось, было решено отказаться от использования прямоугольного сверхпроводника, несмотря на возможность получения большей плотности тока на

обмотке. Поэтому следующий прототип был намотан уже из круглого провода диаметром 0.92 мм. Однако при первом испытании прототипа не удалось достичь требуемых параметров – уровень поля не превысил 6.8 Тл, вместо ожидаемого 7.5 Тл. Исходя из предыдущего опыта создания сверхпроводящих трёхполюсных шифтеров уровнем поля 7 Тл, на них в процессе тренировки всегда достигались запланированные расчётные параметры по величине поля. Поэтому было сделано предположение, что проблема состоит не в расчётах магнитного поля и не качестве самой сверхпроводящей обмотки. В предыдущих трёхполюсных магнитах с такой же технологией намотки катушек и при аналогичных подходах к расчётам геометрии обмоток, максимальное поле стабильно достигало значения не хуже, чем ~5 - 7% от теоретического предела (тока короткого образца). Причём такой запас достигался даже несмотря на то, что обмотки трёхполюсных шифтеров имели гораздо большие геометрические размеры, что потенциально делало обмотку более рыхлой и механически неустойчивой. Исходя из этого, был сделан вывод, что проблема кроется в несовершенстве схемы бандажирования обмоток прототипа, инваровых клиньях, которые при сборке поджимали катушки основанной на относительно стенок магнитопровода с помощью вспомогательных рессор, а при охлаждении сжатие усиливалось за счёт разности коэффициентов теплового расширения материалов. Конструкция такой системы бандажирования показана на Рисунке 33 и Рисунке 34.



Рисунок 33. Внешний вид нижней половинки короткого прототипа 7 Тл вигглера с системой бандажирования, основанной на инваровых клиньях (рессоры сняты).



Рисунок 34. Конструкция первого короткого прототипа 7 Тл вигглера для BESSY-II с системой бандажирования обмоток инваровыми клиньями, подтягиваемыми упругими рессорами.

Такая концепция, удачно применяемая на коротких трёхполюсных шифтерах, была автоматически перенесена и на многополюсный вигглер. Однако относительно длинная магнитная структура, состоящая из большого количества отдельных катушек (даже на коротком прототипе) требовала уже другого подхода к компенсации изменения геометрических размеров при охлаждении и включении магнитного поля. И действительно, после замены поперечных инваровых клиньев на систему продольных шпилек из бериллиевой бронзы, закреплённых с одного конца и стягивающих противоположным концом весь набор катушек, был, наконец, достигнут запланированный уровень магнитного поля. Положительным фактором для усиления бандажирования катушек послужило также дополнительное усилие со стороны шпилек из бериллиевой бронзы, возникающее благодаря большему сокращению шпилек относительно всего набора катушек при охлаждении до криогенных температур. Внешний вид прототипа с изменённой системой бандажирования с использованием бронзовых шпилек и изготовленный из круглого провода, представлен на Рисунке 35. Графики тренировки прототипов с различными системами бандажирования представлены на Рисунке 36 и Рисунке 37.



Рисунок 35. Второй прототип 7 Тл вигглера в сборе. Катушки изготовлены из круглого провода, бандаж - шпильки из бериллиевой бронзы.



Рисунок 36. График тренировки первого прототипа, бандажированного инваровыми клиньями. Максимальное поле – 6.8 Тл.



Рисунок 37. График тренировки второго прототипа, использующего бронзовые шпильки для бандажа. Максимальное достигнутое поле – 7.67 Тл.

На основе второго прототипа был создан полноразмерный магнит, состоящий из 13 центральных и двух пар боковых полюсов. На Рисунке 38 и Рисунке 39 можно увидеть систему бандажирования, состоящую из восьми бронзовых шпилек, в процессе сборки магнита. Внешний вид собранного полного магнита показан на Рисунке 40. В процессе тренировки полного магнита максимальный уровень поля составил 7.47 Тл после шести переходов магнита в нормальное состояние.



Рисунок 38. Система бандажирования бронзовыми шпильками на полном магните (вид сбоку).



Рисунок 39. Система бандажирования бронзовыми шпильками на полном магните (вид с торца).



Рисунок 40. Внешний вид полноразмерной магнитной системы 7 Тл 17-полюсного вигглера для BESSY-II в сборе.

3.1.1.3. Технология изготовления сверхпроводящих катушек

Критерием качества изготовленной сверхпроводящей обмотки является близость максимально достигнутого тока в этой обмотке к току короткого образца используемого провода. Практически качество обмотки определяется плотностью намотки провода, отсутствием, как пустот, так и лишнего объёма компаунда при пропитке, правильно подобранным компаундом и наполнителем, а так же соблюдением оптимального режима полимеризации, при котором в обмотке не накапливаются внутренние напряжения. С точки зрения качества магнитного поля, иметь в виду, что в сверхпроводящих обмотках, в отличие от следует также обычных тёплых катушек, железный сердечник, практически всегда, находится в насыщенном состоянии и, следовательно, магнитное поле формируется в основном витками провода, а не железом. Поэтому при высоких полях возрастает требование к точности и повторяемости изготовления обмоток, которые должны удовлетворять требованиям, стандартным предъявляемым к магнитам, используемым В ускорителях, то есть быть не хуже, чем 0.1 мм.

С практической точки зрения намотку обмоток удобнее проводить в сухую с последующей пропиткой эпоксидной смолой. Такие технологии хорошо развиты в ИЯФ СО РАН и широко используются для пропитки обычных тёплых элементов магнитной структуры ускорителей, таких, как диполи, квадруполи, секступоли, корректора и другие. В этом случае обмотка помещается в замкнутый резиновый мешок, внутренний объем которого откачивается до форвакуума, а затем через специальный патрубок во внутренний объем напускается горячий эпоксидный компаунд, который пропитывает внутренние пустоты обмотки. Далее мешок с обмоткой помещается в автоклав с горячей водой, в котором происходит предварительная полимеризация эпоксидного компаунда при давлении 10 бар и температуре 90 C^0 в течение 10 часов. Окончательная полимеризация проводится в печи при температуре 140 C^0 в течение 10 часов. После остывания обмотки производится скалывание лишних наплывов компаунда. Причём, для облегчения

очистки поверхностей, перед пропиткой на них наносится специальный состав на основе жидкого фторопласта для уменьшения адгезии.

Однако при намотке сверхпроводящих обмоток, в отличие от обычных катушек, необходимо максимально плотно прижимать витки провода друг к другу для исключения их подвижности. Поэтому такие обмотки, имея гораздо более плотную структуру, не позволяют использовать при пропитке наполнители, которые будут отфильтровываться на наружных витках и не проникнут внутрь обмотки. В результате внутренние витки будут связаны только чистым компаундом. Однако так как энергия деформации больше всего накапливается именно в чистых смолах и уменьшается при добавлении минеральных наполнителей, то, как показывает практика, обмотка из Nb-Ti провода, пропитанная чистым компаундом, не является монолитной и имеет склонность к растрескиванию при охлаждении до низких температур из-за значительной разницы коэффициентов теплового расширения материалов. Это приводит к деградации обмотки и отсутствию прироста поля в процессе тренировки. Кроме того, чистые компаунды имеют очень малую теплопроводность, что снижает устойчивость сверхпроводника к потере сверхпроводимости из-за недостаточно быстрого отвода тепла при локальных нагревах внутри обмотки. Добавление же неорганических наполнителей в эпоксидную смолу во многом решает проблемы с выравниванием коэффициентов теплового расширения и увеличивает теплопроводность. Подбор правильной весовой пропорции наполнителя и самого материала наполнителя имеет очень важное значение при изготовлении сверхпроводящих обмоток. При пропитке чистой качество катушки и её устойчивость к преждевременной потере смолой сверхпроводимости может ухудшиться и очевидно, что более всего это касается обмоток большого размера.

Анализ ряда работ по отработке технологии пропитки сверхпроводящих обмоток [46, 47] и собственные эксперименты привели к тому, что намотка большинства сверхпроводящих обмоток для многополюсных вигглеров, созданных в ИЯФ СО РАН, производилась только методом «мокрой» намотки с использованием наполнителя оксида алюминия Al_2O_3 и эпоксидного компаунда горячего отвержения типа ЭД-20. Выбор смолы горячего отвержения объясняется тем, что процесс

намотки катушки является довольно длительным и занимает несколько суток. В течение всего этого времени смола должна оставаться в жидком состоянии, а полимеризация должна осуществляться уже после окончания намотки. Конечно, изготовление обмотки методом «мокрой» намотки, при которой компаунд с наполнителем наносится на витки провода вручную, является гораздо более трудоёмким, требует больших усилий и при этом возникают следующие технологические проблемы:

1) В течение длительного времени необходимо поддерживать температуру катушки на уровне 45±2 С°. Это связано с тем, что при понижении температуры значительно повышается вязкость эпоксидной смолы, что затруднят процесс намотки. При повышении же температуры начинается преждевременный и необратимый процесс полимеризации смолы, вследствие чего появляется опасность не успеть закончить процесс намотки до затвердевания смолы;

2) Пары эпоксидной смолы ядовиты. Поэтому намотку катушек приходится проводить в специально оборудованном объёме с вытяжной вентиляцией;

3) При изготовлении катушки необходимо добиться максимально плотной и регулярной упаковки витков. Присутствие жидкой эпоксидной смолы, наносимой вручную, значительно усложняет намотку. Отметим, что никакие дополнительные изолирующие прокладки между слоями не использовались. Это, с одной стороны, значительно ужесточает требования к изоляции используемого провода и к технологии его намотки. Но, с другой стороны, позволяет увеличить коэффициент обмотки объем заполнения И минимизировать эпоксидного компаунда, растрескивание которого приводит к нагреву сверхпроводящего провода и преждевременной потере сверхпроводимости. Витки каждого последующего слоя должны укладываться точно между витками предыдущего слоя, причём все витки должны плотно прижиматься друг к другу. Такой плотной упаковки можно добиться точным подбором величины зазора между боковыми щёчками, которые ограничивают область намотки. Причём размер зазора должен рассчитываться с учётом межвиткового зазора, величина которого определяется в том числе размерами частиц наполнителя и вязкостью смолы, зависящей от температуры. Эта

83

зазора была неизвестная вначале величина межвиткового измерена 10-12 мкм. Важность этого параметра экспериментально и оказалась равной наглядно можно показать на таком примере. Пусть, например, ошибка в определении величины межвиткового зазора составляет «всего» 10 мкм. В нашем случае при ~70 витках на одном слое суммарная ошибка составит уже 0.7 мм, что почти равно толщине провода (0.85 мм). Многочисленные эксперименты показали, что размер зазора для намотки провода должен быть выдержан с точностью не хуже, чем 0.1 мм. Иначе при более узком зазоре запланированное число витков не поместиться в зоне намотки, а при более широком витки начнут проваливаться на нижние слои. В обоих случаях регулярность витков будет нарушена и дальнейшая намотка будет невозможна. Особенно это важно при намотке крупных катушек, число слоёв в которых может доходить до 40-50. Отметим, что размер зазора должен быть одинаков во всей области намотки. Можно заметить, что особенность такой намотки состоит в том, что витки каждого последующего слоя ложатся в канавки, образующиеся между витками предыдущего слоя, образуя, таким образом, сотовую структуру. Очевидно, что в этом случае в каждом чётном слое будет на 1 виток меньше, чем в нечётном. Поэтому для удержания в пространстве витков коротких чётных слоёв в процессе намотки были использованы временные проставки из стеклотекстолита толщиной 0.45 мм (половина диаметра провода), временно дистанцирующие провод от боковых щёчек и которые удалялись при намотке нечётных Рисунок 41). Плотность И укладки слоёв (см. регулярность сверхпроводящего провода в тестовой обмотке, намотанной для одного из сверхпроводящих вигглеров методом «мокрой» намотки, можно оценить ИЗ Рисунка 42, где показана фотография среза такой обмотки, сделанная под микроскопом. На Рисунке 43 представлен тот же срез при большем увеличении микроскопа, а на Рисунке 44 - общий вид разрезанной для исследований тестовой обмотки.



Рисунок 41. Использование временной проставки (толщиной ½ от диаметра провода) для удержания крайних витков короткого чётного слоя.



Рисунок 43. Срез тестовой обмотки при большем увеличении микроскопа.



Рисунок 42. Вид среза тестовой обмотки под микроскопом.



Рисунок 44. Общий вид разрезанной тестовой сверхпроводящей катушки.

Специально для намотки сверхпроводящих катушек в ИЯФ СО РАН был спроектирован и изготовлен намоточный станок на основе обычного токарного станка марки 1К163, внешний вид которого представлен на Рисунке 45. Для осуществления стабилизированного низкооборотного вращения шпинделя стандартный привод токарного станка был заменён на двигатель постоянного тока с обратной связью по частоте его вращения. Такой привод обеспечивает достаточную плавность хода и необходимую скорость вращения, которая должна составлять около 1 оборота в минуту. Для обеспечения постоянного натяга во время намотки подача провода осуществляется через систему вращающихся блоков. Один из блоков катится по проводу и на нем подвешен груз, обеспечивающий постоянный натяг провода. Четыре герконовых датчика отслеживают вертикальное положение подвижного блока и на основе сигналов с герконов производится автоматическая подача провода со специальной бобины или обратная намотка на эту бобину. Для исключения резких рывков включение и выключение подающего двигателя производится с соответствующим ускорением. Привод подачи провода оснащён дополнительной блокировкой, исключающей рывки и обрывы провода при отказе одного из герконовых датчиков. Для равномерной укладки витков провода на протяжении одного слоя станок оснащён системой автоматического сдвига подачи провода по горизонтали на шаг одного витка. Величину этого шага можно варьировать в зависимости от диаметра провода, используемого для намотки. Нагрев катушки во время намотки осуществляется с помощью обдува горячим воздухом через специальный кожух, который обеспечивает требуемую равномерность нагрева. Температура воздуха стабилизируется системой обратной связи с точностью ±2 С°, что позволяет сохранять вязкость эпоксидной смолы на необходимом уровне в течение всего времени намотки. Процесс намотки сверхпроводящей катушки центрального полюса изображён на Рисунке 46. На Рисунке 47 показана намотанная катушка в технологической оправке для запекания в печи, а на Рисунке 48 представлена готовая обмотка для одного из многополюсных вигглеров.



Рисунок 45. Внешний вид станка для намотки сверхпроводящих катушек.



Рисунок 46. Процесс «мокрой» намотки сверхпроводящей катушки. Показана укладка первого слоя.





Рисунок 47. Намотанная катушка в технологической оправке для запекания.

Рисунок 48. Готовая обмотка для одного их сверхпроводящих многополюсных вигглеров.

Для контроля состояния лаковой изоляции сверхпроводящего провода была простая, разработана достаточно но эффективная система обнаружения электрической закоротки, которая позволяет непрерывно во время всего процесса намотки измерять сопротивление обмотки и оперативно устранять межвитковое и межслойное нарушение изоляции. Метод заключается в непрерывном измерении и выводе в виде графика на экран монитора величины сопротивления всего куска сверхпроводящего провода, которым производится намотка катушки. При этом одна всегда находится на подающей бобине, а остальная часть часть провода наматывается на изготавливаемую катушку. Оба конца провода выведены на медные контактные кольца, которые вращаются вместе с бобиной и катушкой, а сигнал с них снимается неподвижными графитовыми токосъёмниками. Через эту цепь ~ 50 мА и измеряется падение напряжения U_R между пропускается ток токосъемникам. В качестве стабильного источника напряжения использовалась аккумуляторная батарея (U = 12 B), что позволяло избавиться от проблем, связанных с пульсациями. Для точного измерения величины тока измерялось падение напряжения U_r на шунте из манганинового провода сопротивлением $r \sim 7$ Ом, который был вставлен в измерительную цепь последовательно. Нормировка на величину тока I устраняла проблему с уменьшением напряжения аккумуляторной батареи. Измеренное сопротивление провода равно $R = U_R/I = U_R \cdot r/U_r$. Для

контроля работоспособности системы в измерительную цепь последовательно вставлена петля из такого же сверхпроводящего провода, которым наматывалась катушка, причём длина петли равна длине одного витка катушки. Включение или выключение этой петли в общую цепь, эквивалентное удлинению или укорочению измеряемого участка провода на один виток, позволяет оперативно проверять работоспособность измерительной системы. Величина этого лобавочного сопротивления составляет ~0.03 Ом. Температура провода на подающей бобине и на наматываемой катушке стабилизировалась для устранения сильных температурных изменений общего сопротивления провода. Достижение полной термостабилизации провода было довольно затруднительно, да и не требовалось, так как при образовании закоротки сопротивление изменялось скачкообразно, что было легко заметить на фоне медленных температурных уходов. Система обнаружения позволяет оперативно обнаруживать закоротки, возникающие при намотке катушки и устранять их, разматывая катушку обратно до тех пор, пока не восстановится первоначальное сопротивление цепи. Опыт намотки катушек показал, что такая простая система позволяет уверенно регистрировать межвитковые, а тем более межслойные закоротки и значительно уменьшает возможность изготовления бракованной обмотки. Это особенно важно, если учесть высокую стоимость сверхпроводящего провода и большую трудоёмкость процесса «мокрой» намотки.

Таким образом, несмотря на некоторые неудобства, связанные с осуществлением процесса «мокрой» намотки, эта технология была очень хорошо освоена и отработана и преимущества её ярко проявляются в изготовленных таким способом сверхпроводящих обмотках, величина тока в которых достигает до 95% от тока короткого образца, что характеризует очень высокое качество обмотки.

3.1.1.4. Защита обмоток при потере сверхпроводимости

При приближении к критической плотности тока в реальной сверхпроводящей обмотке возрастает вероятность выхода из сверхпроводящего состояния.

Теоретически достижимым пределом при этом является ток короткого образца в данном поле, который определяется нагрузочной кривой данного провода. Однако реально достижимый ток всегда меньше тока короткого образца, так как существует ряд факторов, вызывающих преждевременный переход в состояние нормальной проводимости:

1. При запитке сверхпроводящих обмоток электрическим током и увеличении уровня поля внутри обмотки начинают действовать пондеромоторные силы, которые приводят к деформации материалов обмотки. Причём уровень сил может достигать очень больших значений. Например, при уровне поля на обмотке $B \approx 8.5$ Тл давление магнитного поля можно оценить как $P = B^2[\kappa\Gamma c]/8\pi \approx 300$ [атм]. Это приводит к движению витков и «растрескиванию» обмотки, сопровождающемуся образования выделением тепловой энергии, вплоть до зоны нормальной проводимости на некотором участке сверхпроводника. Для оценки величины энергии, способной вызвать нагрев, достаточный для потери выделяемой сверхпроводимости, предположим, что сверхпроводник, имеющий плотность тока $j = 3 \cdot 10^4 A/cm^2$, сдвинулся в поле B = 6Тл. В этом случае получим, что при сдвиге всего на $\delta = 10$ мкм выделение энергии составит $\Delta E = 1.8 \cdot 10^{-2}$ Дж/см³, что при очень низкой теплоёмкости сплавов при гелиевой температуре ($\sim 10^{-3} \, \text{Дж/см3} \cdot K$) нагреет композит на несколько градусов и выведет его из сверхпроводящего состояния. Это следует из выражения (2.20)

2. Растрескивание эпоксидного компаунда происходит под действием пондеромоторных сил со снятием локальных напряжений, образующихся при его застывании и полимеризации. Когда напряжение σ будут прикладываться к компаунду, то в нем будет накапливаться упругая энергия ~ $\sigma^2/2E$, где *E* - модуль Юнга. Выделение энергии при этом составляет ~ $8 \cdot 10^{-2}$ Дж/см³[47].

3. Уменьшение токонесущей способности вследствие неизбежной деформации провода при изготовлении обмотки, а так же деформации обмотки ввиду разных коэффициентов термического сжатия используемых материалов при охлаждении до гелиевых температур. Из Рисунка 49, представленного в работе [46], на котором показана зависимость критической плотности тока в сверхпроводящем проводе от

механической нагрузки, приложенной к проводу, видно, что допустимым является натяжение, приводящее к относительному удлинению не более чем $\varepsilon \sim 0.3$ %, что соответствует натяжению $\sigma \sim 100$ МПа.



Рисунок 49. а) Зависимость механического напряжения от деформации при комнатной температуре и при 4 К для меди, сплава Nb-Ti и композитного Nb-Ti провода; б) Зависимость деградации критического тока от натяжения провода при разных уровнях магнитного поля для композитного Nb-Ti провода.

Во время перехода в состояние нормальной проводимости происходит быстрое выделение запасённой в магните энергии, что приводит к резкому испарению жидкого гелия и его потерям при выбросе в атмосферу. Однако наибольшую опасность при этом представляет локальный разогрев места первоначальной потери сверхпроводимости, температура которого резко возрастает с ростом сопротивления нормальной зоны. Это в лучшем случае приведёт к большим механическим напряжениям вследствие разных коэффициентов теплового расширения материалов обмотки, а в худшем – к расплавлению изоляции или даже самого провода. Поэтому для сохранности обмотки необходимо как можно скорее вывести ток из этого участка обмотки, так как мощность нагрева зависит от тока квадратично.

Некоторая часть накопленной энергии в магните может быть выведена на внешнее сопротивление, расположенное снаружи криостата. Это позволяет испарение и сократить потери жидкого гелия, а также понизить уменьшить опасность, связанную с появлением избыточного давление газа внутри криостата. Однако надёжность такого активного метода защиты полностью зависит от безотказной работы системы регистрации и выключателя тока. Поэтому пассивные способы защиты без применения предпочтительнее использовать дополнительных электронных и механических устройств, вносящих элемент ненадёжности.

Наиболее удобный способ защитить обмотку от повреждения – использовать для этого шунтирование участка обмотки с помощью параллельно подсоединённого резистора. Сопротивление шунта должно быть, с одно стороны достаточно мало, чтобы в процессе роста нормальной зоны в проводе ток из соответствующего участка перетекал в шунтирующий резистор. Однако в этом случае будет затруднён быстрый подъем тока в обмотке ввиду ответвления тока в шунт. И если в обычном соленоиде при этом просто увеличивается время подъёма тока и испаряется больше жидкого гелия, то для сверхпроводящего вставного устройства, это приводит к рассогласованию заданных токов и токов, реально протекающих в обмотках и, следовательно, изменению интегралов поля и неуправляемому воздействию на орбиту пучка в накопителе.

Для устранения такого эффекта было предложено вставлять в шунтирующую цепь последовательно диоды, которые при гелиевой температуре имеют порог открывания ~ 4-5 В (это напряжение было измерено экспериментально, так как производители не предоставляют данные для температур ~4K). Таким образом, при последовательном соединении нескольких обмоток, общее напряжение открывания диодных сборок составит уже десятки вольт. В этом случае при подъёме тока в магните при характерном максимальном напряжении источника питания ~ 10 В открывания диодов не происходит и токи не ответвляются в шунты. При потере сверхпроводимости диоды открываются, и токи затухают на шунтах, защищая обмотки.

Здесь же можно отметить дополнительное преимущество от использования цепочек диодами. Обычно шунтирующих с для детектирования потери сверхпроводимости используются мостовые схемы, на которых появляется напряжение при переходе одного из участков цепи в нормальное состояние. В этом возникает проблема с выбором порогового напряжения случае часто ДЛЯ формирования сигнала срабатывания детектора. Так, при низком пороге напряжения возможны ложные срабатывания, которые отключат источники питания, что автоматически приведёт с выключению поля в магните и сбросу электронного пучка в накопителе. Использовать вставное устройство с такими непредсказуемыми свойствами на непрерывно работающем накопителе, скорее всего, будет невозможно. С другой стороны, повышение порога срабатывания детектора может привести к запаздыванию выключения источников питания и сгоранию обмоток. Использование же холодных диодов даёт возможность использовать сигнал для детектора непосредственно с защитных резисторов. Сигналы со всех защитных резисторов собираются по схеме «ИЛИ» и используются детектором. Напряжения на этих резисторах гарантировано появится только после реальной потери сверхпроводимости И открывания диодов, что значительно повышает помехозащищённость системы детектирования выхода магнита ИЗ сверхпроводящего состояния и общую надёжность вставного устройства.

Критерием допустимого нагрева обмотки является максимальная температура θ_m в точке, которая первая перешла в нормальное состояние. На практике выполняется условие локальной адиабатичности, так как затухание поля обычно длится в течение секунды, а время выравнивание температуры за счёт теплопроводности измеряется десятками секунд. Такой подход даёт только приблизительную верхнюю оценку максимальной температуры нагрева, так как за время этого процесса электрическое сопротивление обмотки меняется в сотни раз, а теплоёмкость на четыре порядка величины. В работе [49] был предложен способ описания процесса, основанный на уравнении теплового баланса:

$$J^{2}(T)\rho(\theta)dT = \gamma C(\theta)d\theta, \qquad (3.8)$$

где J(T) – плотность тока в обмотке, изменяющегося во времени, $C(\theta)$ – удельная теплоемкость и γ - удельная плотность обмотки, а $\rho(\theta)$ - удельное сопротивление провода. Интегрируя выражение (3.8), получим соотношение:

$$\int_{0}^{\infty} J^{2}(T)dT = J_{0}^{2}T_{d} = \int_{\theta_{0}}^{\theta_{m}} \frac{\gamma C(\theta)}{\rho(\theta)} d\theta = U(\theta_{m})$$
(3.9)

Введённая здесь универсальная функция $U(\theta_m)$, зависящая только от физических свойств материалов и характеризующая устойчивость обмотки к перегреву, позволяет оценить максимальную температуру по начальной плотности тока J_0 и характерному времени затухания тока T_d . Полученная расчетным путем функция $U(\theta_m)$ для меди с RRR=100 и RRR=50, алюминия и для типичной Nb-Ti обмотки, состоящей по объёму из 23% Nb-Ti сплава, 47% меди и 30% эпоксидного компаунда, приведённая в работе [**50**]. показана на Рисунке 50.

Следует заметить, что функция $U(\theta_m)$ для чистого сплава Nb-Ti здесь не приводится, так как в приведенном масштабе эта функция слишком мала из-за очень высокого сопротивления в нормальном состоянии. В частности, это означает, что магнит, изготовленный из чистого Nb-Ti сплава без наличия меди однозначно расплавится при потере сверхпроводимости, если время разряда превысит ~1мс. Из графика для Nb-Ti обмотки можно сделать практический вывод о том, что при типичной плотности тока $J_0 = 3 \cdot 10^8 \ A/m^2$, провод перегорает, когда время его разряда превысит $T_d = 0.85$ с. При этом точка зарождения нормальной зоны достигнет комнатной температуры через 0.49 с, а повреждение изоляции ($\theta_m \approx$ 500*K*) наступит через 0.62 с. Обычно в качестве верхнего предела принимают комнатную температуру, хотя безопасным пределом с точки зрения температурных деформаций лучше использовать границу ~100 K, так как до этой температуры деформации большинства используемых материалов незначительны, что легко заметить из графиков на Рисунке 51.





Рисунок 50. Функция $U(\theta_m)$ для: 1меди с RRR=100; 2- меди с RRR=50; 3алюминия; 4- обмотки (23% Nb-Ti, 47% меди и 30% эпоксидного компаунда).

Рисунок 51. Относительный коэффициент теплового расширения некоторых материалов при криогенных температурах [51].

Полная энергия, запасённая в полноразмерном 17-полюсном вигглере с полем 7 Тл, составляет ~450 кДж. Точный расчёт процесса перехода всего многополюсного вигглера в нормальное состояние, довольно затруднён, так как для этого необходимо точно знать заранее как минимум такие параметры, как:

- Температурная зависимость теплопроводности и теплоёмкости эпоксидного компаунда с наполнителем, которым пропитаны сверхпроводящие обмотки, на всем диапазоне температур;
- 2. Теплопроводность лаковой изоляции, в зависимости от температуры;
- 3. Реальную величину RRR меди в сверхпроводящем проводе;
- Критические характеристики сверхпроводящего провода в каждой конкретной катушке (могут отличаться, так катушки наматываются из разных кусков провода с характерной длиной ~ 2 км при общей длине провода для намотки всего вигглера ~10 – 20 км);
- 5. Качество каждой конкретной катушки с точки зрения плотности намотки провода, что влияет на преждевременную потерю сверхпроводимости.

Предсказать заранее по какому именно сценарию пойдёт процесс перехода в нормальное состояние в каждом конкретном случае, практически невозможно, тем более, что в процессе типичной тренировки должны каждый раз теряют сверхпроводимость первыми все новые обмотки. Поэтому более важным скорее является выбор правильной концепции защиты обмоток таким образом, чтобы влияние всех этих неизвестных параметров на длительность и последовательность перехода в нормальное состояние каждой конкретной катушки было бы несущественным. При этом защита должна быть спроектирована таким образом, чтобы надёжно парировать любой из возможных реальных вариантов сценария. Поэтому весь процесс перехода в нормальное состояние должен быть предсказуемым с точки зрения затухания и распределения энергии в магните и надёжно обеспечивал сохранность обмоток.

Коммутация обмоток вигглера осуществлена таким образом, чтобы, с одной стороны, запитать обе секции центральных полюсов соответствующими оптимальными токами для получения максимального поля, а с другой стороны, чтобы появилась возможность управлять первым интегралом поля, перераспределяя эти токи между дополнительными боковыми катушками с полем ¹/₄ и ³/₄. Упрощённая схема запитки катушек вигглера представлена на Рисунке 52.



Рисунок 52. Упрощённая схема коммутации обмоток многополюсного вигглера с использованием двух независимых источников тока

В соответствие со схемой, для уровня поля 7 Тл, ток $I_1 = 141$ А, протекает не только по всем внутренним и наружным обмоткам центральных полюсов, соединённым последовательно, но и по боковым катушкам с полем ¹/₄. Ток же $I_2 = 229$ А добавляется в наружные обмотки центральных полюсов и запитывает дополнительные катушки с полем ³/₄, имеющим противоположное направление поля

с катушками ¹/4. Таким образом суммарный ток на наружных секциях, на которых уровень поля меньше, чем на внутренних, составляет $I_1 + I_2 = 141 + 229 = 370$ А.

Считая, что критерием надёжности при переходе в нормальное состояние является величина максимальной температуры при нагреве обмоток, проанализируем, до какого уровня поднимутся температуры в некоторых крайних случаях:

Предположим, что потеря сверхпроводимости произошла при отсутствии 1. дополнительной защиты обмоток. Худшим случаем будем считать выход из состояния сверхпроводимости только одной обмотки. После этого система обнаружения нормальной зоны устанавливает нулевой уровень тока в источниках питания. Как показали результаты испытаний прототипа, через 5-10 мс после начала перехода в состояние с нормальной проводимостью (например во внутренней секции) из-за нагрева выйдет из сверхпроводящего состояния и наружная секция того же полюса. Токи в обеих секциях начнут затухать, а все остальные катушки при этом будут продолжать оставаться в сверхпроводящем состоянии. Следовательно, вся накопленная энергия вигглера (~ 450 кДж для 7 Тл) будет выделена только в этих двух секциях. Расчётная температура достигнет в этом случае 430 К, что может разрушить катушку. Это является, конечно, оценкой сверху. На самом деле процесс будет происходить гораздо сложнее и безопаснее для обмоток. Так как все катушки связаны большой взаимной индуктивностью, то магнитный поток перебросится из токовой цепи, в которой сорвалась первая катушка в соседнюю цепь, где, благодаря повышению тока выше критического, так же произойдёт потеря сверхпроводимости. В идеальном случае, если сорвутся все катушки и энергия равномерно распределится по всему магниту, то температура повысится незначительно. Однако, в реальности большая доля энергии может выделится только в нескольких соседних катушках.

2. Теперь рассмотрим процессы, происходящие в вигглере, обмотки которого защищены цепями из встречно включённых диодов и резисторов, расположенных параллельно обмоткам, как представлено на Рисунке 53. Идеальным вариантом, конечно, стала бы индивидуальная защита такой цепью каждой из сверхпроводящих обмоток. Однако, в этом случае, система защиты сильно

усложнилась бы, так как потребовалось бы ~ 120 диодов. Поэтому более разумно было бы разбить полную цепь последовательно соединённых обмоток, на несколько секций, в каждой из которых выделялась бы безопасная доля энергии. Будем считать, что совершенно безопасной считается такая энергия, при выделении которой обмотка не нагревается выше температуры жидкого азота 80К, при которой тепловое расширение обмоток ещё остаётся незначительным (см. Рисунок 51). Из практических соображений можно считать, что на каждой защитной секции безопасно может выделиться 30 – 50 кДж. Таким образом, полноразмерный вигглер с полной энергией 450 кДж при поле 7 Тл был разбит на 16 защитных секций. При этом учитывалось, что по внутренним секциям протекает только ток $I_1 = 141$ A, а $I_1 + I_2 = 141 + 229 = 370$ A. проходит суммарный по наружным ток Соответственно, внутренние катушки (с меньшим током) были разбиты на зашунтированные секции из 5 обмоток, а наружные (с большим током) – по 3 обмоток.



Рисунок 53. Полная схема коммутации и защиты обмоток 17 полюсного 7 Тл вигглера для BESSY-II.

Сохранность сверхпроводящей обмотки при переходе в нормальное состояние определяется, в том числе, и сопротивлением поглощающего резистора, выбор величины которого является предметом компромисса:

1. С одной стороны, время затухания тока не должно превышать некоторого критического времени для данного диаметра сверхпроводящего провода. В частности, для используемого Nb-Ti провода с диаметром 0.9 мм это время должно быть не более ~0.5 с, как следует из Рисунка 50. Для этого сопротивление резистора должно быть как можно больше. Для грубой оценки можно принять, что, если бы даже весь вигглер перешёл одновременно в нормальное состояние и сопротивление всех обмоток составило бы этом случае ~ 1 Ом, то при общей индуктивности ~ 2 Гн время затухания без дополнительного сопротивления защиты можно оценить как: $\tau \sim L/R = 2\Gamma H/1 O_M = 2 c$, что может привести к

сгоранию обмотки. Поэтому для ограничения времени перехода в нормальное состояние до безопасных 0.5-1 с величина дополнительного сопротивления должна быть:

$$R \sim L/\tau = 2 \Gamma H/1 c = 2 OM$$
 (3.10)

2. С другой стороны, напряжение на обмотке не должно превысить некоторого напряжения пробоя, определяемого электрической прочностью изоляции, которая проверяется при изготовлении. Все изготовленные обмотки проверяются на контрольное напряжение ~500 В, однако из практических соображений будем считать, что напряжение не должно превышать 300 В. Величина напряжения при потере сверхпроводимости определяется выбором сопротивления резистора, которое должно быть в этом случае быть как можно меньше. Так при токе 200 А, сопротивление не должно превышать:

$$R \sim \frac{U_{max}}{I} = \frac{300 \text{ B}}{200 \text{ A}} = 1.5 \text{ Om}$$
 (3.11)

В результате величина резисторов была выбрана 0.1 Ом на каждой из 16 секции и, соответственно, общее сопротивление составило 1.6 Ом.

Предположим, что нормальная зона появляется сначала во внутренней обмотке одного из центральных полюсов. Затем детектор выдаёт сигнал на зануление токов в источниках питания. Благодаря хорошему тепловому контакту через 5-10 мс (экспериментальные данные из испытания прототипа) теряет

сверхпроводимость и наружная секция того же полюса. Появление на этих обмотках участков с нормальной проводимостью приводит к росту напряжений, которые открывают диоды, и ток из этих секций переходит в соответствующие шунтирующие защитные цепи. Далее энергия этих секций переходит в соседние и противоположные секции, после чего диоды в них также открываются и начинают проводить ток, а токи через соответствующие обмотки затухают. Далее таким же образом последовательно открываются диоды остальных секций, и процесс распространяется дальше по соседним обмоткам, пока хватает энергии.

При проектировании системы защиты полного магнита были приняты во внимание экспериментальные данные, полученные при испытании короткого прототипа. На Рисунке 54 представлен процесс перехода короткого прототипа из круглого провода в нормальное состояние, во время которого велась запись напряжений с каждой обмотки с помощью многоканального осциллографа. Отдельными группами, по четыре графика в каждой группе, показаны напряжения на двух противоположных полюсах, состоящих из наружной и внутренней обмотки и расположенных друг напротив друга сверху и снизу относительно магнитного зазора. Из поведения напряжений, в частности, можно заключить, что первой сорвалась внутренняя обмотка одного из полюсов, на которой напряжение начало расти быстрее, чем на других обмотках. Затем через 10 мс сорвалась и наружная секция той же самой катушки, после чего с той же задержкой в течение 50 мс сорвались все остальные катушки короткого прототипа. Так как это время намного меньше общего времени затухания токов в обмотках, составляющего ~ 0.5 с, то можно утверждать, что энергия поглощалась по всему магниту, практически, равномерно, что безопасно с точки зрения сохранности сверхпроводящих обмоток. Обратим внимание, что в процессе затухания токов часть энергии идёт также на нагрев индукционными токами железных сердечников и энергия распределяется довольно равномерно сорванная первой обмотка нагревается, в худшем случае, не выше 140 К.



Рисунок 54. Напряжения на обмотках короткого прототипа в процессе перехода в нормальное состояние.

В процессе тренировки полноразмерного магнита также во время каждого из переходов в нормальное состояние записывались напряжения со всех 60 обмоток вигглера, включая и боковые обмотки катушек ¹/₄ и ³/₄. На Рисунке 55 представлено последовательно поведение напряжений на каждом из 17 полюсов во время одного из переходов в нормальное состояние, из которого можно заключить, что первой по времени в данном случае потеряла сверхпроводимость внутренняя обмотка нижнего полюса номер 6 И далее нормальная зона стала распространяться к противоположным концам магнита. Затем перешла в нормальное состояние внутренняя секция противоположной верхней катушки этого же полюса, причём токи затухали на обеих катушках в течение безопасных для сгорания 0.2 с. На наружных же катушках этого же 6 полюса токи плавно затухали уже без потери сверхпроводимости в течение 0.6 с. Затем от полюса номер 6 к обоим концам вигглера побежали волны переходов в нормальное состояние, в процессе которых, на каждом из соседних полюсов напряжения появлялись с задержкой ~0.1-0.2 с и весь процесс закончился на ближнем конце через ~1.4 с, а на дальнем через ~2 с. Можно заметить, что напряжения на последовательно соединённых обмотках вигглера возникало не одновременно, а было последовательно растянуто по времени в процессе продвижения нормальной зоны от полюса к полюсу, что значительно уменьшило риск перенапряжения и электрического пробоя. В итоге максимальное напряжение на каждой отдельной обмотке не превысило 30 В.





Рисунок 55. Графики распространения нормальной зоны (напряжений на обмотках полюсов) в 17-полюсном вигглере. Первоначальное появление нормальной зоны произошло на полюсе N6 (момент времени 1.67 с) и стало распространяться к разным концам вигглера. Нормальная зона распространилась к ближнему концу вигглера (полюс N2) за 1.4 с, а к дальнему (полюс N16) за 2 с. Максимальное напряжение на обмотках не превышает 30 В.

Можно отметить, при данном переходе в нормальное состояние практически на каждом от центральных 13 полюсов происходил переход провода в нормальное состояние только на внутренних секциях катушек, а токи на внешних секциях при этом затухали без потери сверхпроводимости. Поэтому можно предположить, что наружные секции оказались при данном соотношении токов менее загружены током и имели больший запас до критического состояния. Отметим, что здесь был представлен только один из нескольких десятков переходов в нормальное состояние, проведённых во время тренировки. В последующих переходах токи между наружными и внутренними секциями специально перераспределялись так, чтобы теряли сверхпроводимость и наружные катушки. Таким образом, существует выбрать весь потенциальный запас по характеристикам провода, возможность оттренировав большинство катушек и достигнув при этом максимальной величины поля. Следует отметить, что, несмотря на то, что в процессе расчётов предполагается, что токи в обеих цепях должны быть примерно одинаковыми, но, так как, в конце концов, эти токи должны соответствовать и условиям зануления первого интеграла поля вигглера, то окончательные значения токов будут иметь некоторый перекос, который заранее трудно точно предсказать. Поэтому на токах, обязательно соответствующих нулевым интегралам, не будет получен

максимальный уровень поля, при котором как наружные, так и внутренние секции обмоток должны быть одинаково близки к критическим параметрам использованного сверхпроводящего провода.

В процессе тренировки полноразмерного вигтлера было достигнуто максимальное поле 7.67 Тл за шесть переходов в нормальное состояние. Испытания показали работоспособность и надёжность выбранной системы защиты обмоток. Во время многолетней (в течение ~ 15 лет) эксплуатации этого вигтлера на накопителе BESSY-II происходили многочисленные потери сверхпроводимости по разным причинам, которые ни разу не привели к повреждению сверхпроводящих обмоток. На Рисунке 56 показан внешний вид 17-полюсного 7 Тл вигглера, установленного на накопителе BESSY-II. В Таблице 3.2 представлены основные характеристики этого вигглера.

Таблица 3.2. Основные параметры 17-полюсного 7 Тл вигглера для BESSY-II

Критическая энергия фотонов (на 1.9 ГэВ), КэВ	16.8
Поле на оси вигглера (рабочее/максимальное), Тл	7.0/7.67
Поле на обмотке, Тл	8.1
Длина периода, мм	148
Число полюсов	13+4
Горизонтальная апертура, мм	110
Вертикальная апертура, мм	13
Магнитный зазор, мм	19
Запасённая энергия, кДж	450
Полная энергия излучения (1.9 ГэВ, 0.5 А), кВт	56



Рисунок 56. Внешний вид 17-полюсного 7 Тл вигглера, установленного на накопителе BESSY-II.

Таким образом, можно заключить, что при создании 17-полюсного 7 Тл вигтлера для института HMI на накопителе BESSY-II, особенности конструкции которого подробно представлены в работах [108, 109, 115, 118, 121 и 122], были сформулированы и проверены на реальном магните основные принципы построения многополюсных вигглеров, которые в дальнейшем, в той или иной мере, были использованы в конструкции всех остальных многополюсных сверхпроводящих вигглеров, созданных в ИЯФ СО РАН:

1. Концепция оптимизации основных параметров вигглера (зазор, поле и период) для получения максимального спектрального потока генерируемого синхротронного излучения;

2. Разбиение обмоток на две секции, запитываемых оптимальным током, с целью увеличения уровня поля на ~13-15%;

3. Использование секционирования обмоток для раздельной запитки разными токами с целью зануления интегралов поля;

4. Концепция бандажирования обмоток с помощью продольных бронзовых шпилек, что особенно важно для магнитов с высоким уровнем поля;

5. Концепция защиты обмоток вигглера при потере сверхпроводимости, при которой все обмотки разбиваются на группы, шунтируемые цепочкой из диодов и резисторов, в которых поглощается безопасное количество энергии.

3.1.2 21 – полюсный вигглер с полем 7.5 Тл и периодом 164 мм для Курчатовского источника Сибирь-2

Потребность в создании следующего вигглера с высоким уровнем поля возникла на Курчатовском источнике синхротронного излучения (накопитель Сибирь-2, Москва) с энергией электронов 2.5 ГэВ и током 0.2 А для проведения экспериментов с материалами, содержащими тяжёлые элементы, требующих большой поток фотонов в жёстком рентгеновском диапазоне. Для этих целей была разработана магнитная структура, содержащая в результате оптимизации, 19 центральных полюсов с пиковым полем 7.5 Тл при периоде 164 мм и 2 дополнительных боковых полюсах с половинным полем для замыкания орбиты. При постановке такого вигглера на накопитель интенсивность СИ в спектральном диапазоне, перекрываемым СИ из поворотных магнитов с полем 1.7 Тл с характеристической энергией квантов 7 КэВ, увеличивалась более чем на порядок за счёт количества полюсов, а за счёт увеличения магнитного поля до 7.5 Тл характеристический спектр излучения сдвигался в коротковолновую часть спектра в район 25-50 КэВ. При этом число фотонов в интересующей нас области энергий до 200 КэВ возрастало в ~ 100 и более раз, что открыло возможность работы с материалами, содержащими тяжёлые элементы. Спектр излучения из этого вигглера, в сравнении с обычным поворотным магнитом с полем 1.7 Тл, являющимся частью магнитной структуры накопителя, представлен на Рисунке 57. Полная мощность излучения на энергии 2,5 ГэВ и токе 100 мА составляет 36 кВт.



Рисунок 57. Спектральный поток фотонов из поворотного магнита 1.7 Тл накопителя Сибирь-2 и из 7.5 Тл 21-полюсного вигглера.

Углы отклонения равновесной орбиты вигтлера в горизонтальной плоскости при изменении магнитного поля в пределах 2.5 Тл - 7.7 Тл на энергии электронов 2.5 ГэВ меняются от \pm 7.8 мрад до \pm 25 мрад, что соответствует горизонтальному размеру пучка на выходе из вигглера (на длине 1640 мм), равному \pm 50 мм. Такой широкий пучок накладывает требование на форму вакуумной камеры в вигглере в горизонтальном направлении, которую на выходе из вигглера было предложено выполнить в виде конуса, расширяющегося в направлении распространения излучения так, чтобы на длине вигглера горизонтальная апертура стала равна 120 мм и угол выхода составил \pm 30 мрад. Такая широкая вакуумная камера потребовала принятия специальных мер для обеспечения её механической устойчивости, о чем более подробно будет рассказано в Главе 5.4.

Излучение из вигглера выводится в экспериментальный зал по трём каналам вывода излучения. Центральный канал расположен по оси вигглера, излучение с критической энергией 31 КэВ выводится из поля 7.5 Тл. Боковые каналы расположены под углами 13.3 мрад и 17 мрад к оси вигглера. Критическая энергия фотонов равна, соответственно 25.7 и 21.5 КэВ, величина поля в точке излучения – 6.2 Тл и 5.2 Тл. Характеристики излучения в трёх каналах вывода излучения представлены в Таблице 3.3.

Название	Угол вывода,	Критическая энергия,	Плотность мощности
канала	мрад	КэВ	излучения, Вт/мрад
XSA	-17 ± 1	21.5	650
Hard X-Ray	0 ± 1	31 (макс. до 150 КэВ)	940
RS-MCD	13.3 ± 1	25.7	760

Таблица 3.3. Характеристики трёх каналов вывода синхротронного излучения из сверхпроводящего 7.5 Тл 21-полюсного вигглера на 2.5 ГэВ накопителе Сибирь-2.

Конструкция основного полюса была оптимизирована на достижение максимального поля на орбите 7.5 Тл для достижения требуемой поперечной однородности 0.05% с учётом максимального тока используемых источников питания. Результат оптимизации представлен в Таблице 3.4.

Таблица 3.4. Основные параметры центрального полюса магнитной структуры 7.5 Тл вигглера для накопителя Сибирь-2

Магнитное поле на орбите/на обмотке, Тл	7.5/8.1
Диаметр провода без изоляции/ с изоляцией, мм	0.87/0.92
Отношение Nb-Ti:Cu	0.43
Критический ток при поле 7 Тл, А	380
Количество секций	2
Число витков в слое	60/59
Число слоёв/ витков в 1 секции	13/774
Число слоёв/ витков во 2 секции	13/773
Сечение сердечника, мм	236 x 82
Высота полюса, мм	75.8
Ток в 1 секции при 7.5 Тесла, А	177
Ток во 2 секции при 7.5 Тесла, А	373

На Рисунке 58 представлено положение рабочих точек на внутренней и наружной секции центрального полюса относительно критической кривой используемого провода, а на Рисунке 59 - расчётное поперечное распределение



магнитного поля на медиане центрального полюса при критических токах на обмотке.

Рисунок 58. Положение рабочих точек на 59. Рисунок Расчётное поперечное внутренней наружной распределение И секции магнитного поля на центрального полюса относительно медиане центрального полюса при критической критических токах на обмотке. кривой используемого соответствующие провода, полю на мелиане 7.6 Тл.

В результате тренировки магнитной системы в жидком гелии было достигнуто максимальное поле величиной 7.7 Тл. На Рисунке 60 показан внешний вид одной половинки магнитной системы вигглера в процессе сборки, на Рисунке 61 - процесс погружения полной магнитной системы 7.5 Тл 21-полюсного вигглера в испытательный криостат. Внешний вид собранной магнитной системы 7.5 Тл 21полюсного вигглера с системой защиты обмоток представлен на Рисунке 62. В 2006 году данный вигглер был установлен на накопитель Сибирь-2 и используется для проведения экспериментов с синхротронным излучением. Первые результаты использования вигглера и процесс адаптации магнитной структуры накопителя Сибирь-2 для работы 7.5 Тл 21-полюсного вигглера представлены в работах [**52**] и [**135**]. Внешний вид вигглера, установленного на накопителе Сибирь-2, представлен на Рисунке 63. Основные параметры 7.5 Тл 21-полюсного вигглера представлены в Таблице 3.5.
Критическая энергия фотонов (на 1.9 ГэВ), КэВ	31
Поле на оси вигглера (Рабочее/Максимальное), Тл	7.5/7.7
Длина периода, мм	164
Число полюсов	19+2
Коэффициент ондуляторности К	~115
Горизонтальная апертура, мм	120
Вертикальная апертура, мм	14
Магнитный зазор, мм	20.2
Магнитная длина, мм	1640
Токи в обмотках (внутренняя/наружная), А	177/(177+96)
Запасённая энергия, кДж	500
Полная энергия излучения (2.5 ГэВ, 0.1 А), кВт	36
Время подъёма поля до 7.5 Тл, мин	≤ 15

Таблица 3.5. Основные параметры 17-полюсного 7.5 Тл вигглера для Сибирь-2





 Рисунок
 60.
 Внешний вид
 одной
 Рисунок 61.
 Процесс погружения полной

 половинки магнитной системы
 7.5
 Тл 21 магнитной системы
 7.5
 Тл 21

 полюсного вигглера в процессе сборки.
 вигглера в испытательный криостат.





Рисунок 62. Внешний вид собранной магнитной системы 7.5 Тл 21-полюсного вигглера с системой защиты обмоток.

Рисунок 63. Вид 7.5 Тл 21-полюсного вигглера установленного на накопителе Сибирь-2.

3.1.2.1. Особенность зануления интегралов поля в многополюсных вигглерах

Свободное пространство внутри прямолинейного промежутка накопителя Сибирь-2 составляло всего 2.4 м, поэтому для размещения максимального количества полюсов и обеспечения необходимого потока фотонов на нужной энергии была выбрана упрощённая схема с боковыми полюсами без $\frac{1}{2}$ использования полюсов ³/₄. Кроме того, чтобы вписаться в свободное пространство пришлось также значительно уменьшить длину криостата и упростить его внутреннюю конструкцию в месте сопряжения с накопителем, удалив тепловой перехват 20 К с сильфонов вакуумной камеры. Несмотря на то, что это создало некоторую неоптимальность в балансе теплопритоков криогенной системы, зато была решена главная задача – обеспечение генерации достаточного числа фотонов в требуемом диапазоне энергий. Такая упрощённая схема с единственным боковым полюсом 1/2 имеет недостаток в виде горизонтального отклонения орбиты пучка внутри вигглера от центральной оси, как это легко заметить из Рисунка 64а. Различные схемы использования дополнительных боковых полюсов для зануления первого интеграла поля в многополосных магнитных структурах, более подробно описанные в работе [137].



Рисунок 64. Траектория электронного пучка в многополюсных магнитных структурах при различных способах зануления интегралов поля: a) использование одного бокового полюса с полем ¹/₂ и длиной, равной основному полюсу; b) использование бокового полюса половинной длины с полным полем; c) использование боковых полюсов стандартной длины с полем ¹/₄ и ³/₄ от основного поля.

При использовании бокового полюса с полем ¹/₂ его магнитная длина должна совпадать с длиной основного полюса. В принципе вариант с боковым полюсом половинной длины и с уровнем магнитного поля, совпадающего с полем в основном полюсе (см. Рисунок 64b), также обеспечит нулевой первый интеграл. Однако физически на половинной длине невозможно получить такое же большое поле, как на центральном полюсе, который уже был оптимизирован именно на предмет достижения максимального поля при заданном магнитном зазоре и минимально возможной длине полюса. На Рисунке 64с представлена наиболее удобная и чаще всего используемая схема компенсации орбиты боковыми полюсам, имеющими уровень поля ¹/₄ и ³/₄, при которой ось орбиты пучка точно совпадает с осью вигглера. Важным вопросом здесь является выбор конфигурации токов для оптимальной запитки всех обмоток вигглера. При этом нужно учитывать следующие требования:

1) Используемые токи должны быть, по возможности, одинаковыми между собой (с точки зрения упрощения выбора максимального тока у источников питания);

111

2) Токи должны иметь наименьшую величину для снижения тепловой нагрузки на криогенную систему при вводе в жидкий гелий.

При наличии двух независимых токов I_1 и I_2 для запитки центральных обмоток, состоящих из одной секции, удобно использовать сумму этих токов $(I_1 + I_2)$. В случае же двухсекционной обмотки логично по внутренней секции (с большим полем) пускать ток I_1 , а по наружной (с меньшим полем) сумму $(I_1 + I_2)$. Теперь рассмотрим возможные варианты запитки боковых обмоток многополюсного вигглера, обеспечивающих одновременно, как максимальное поле на центральной обмотке, так и замыкание орбиты пучка путём перераспределения токов:

1) В случае использования односекционной центральной обмотки с суммарным током $(I_1 + I_2)$, по боковому полюсу с полем ½ можно пускать любой из их этих двух токов (неважно какой). При увеличении любого из этих токов при настройке интеграла второй ток нужно уменьшить на такую же величину для сохранения полного тока на центральной обмотке. Можно для простоты считать, что для достаточно большого уровня поля на центральном полюсе односекционной обмотки (когда железо в нем уже насыщено и его вклад можно представить в виде постоянного поля $B_0 \sim 2$ Тл) его величину B можно аппроксимировать линейно, как это показано на Рисунке 65, с неким коэффициентом пропорциональности K, зависящим от числа витков в обмотке:

$$B = B_0 + K \cdot (I_1 + I_2) \tag{3.12}$$



Рисунок 65. Зависимость магнитного поля в медианной плоскости от тока в обмотке.

2) Для двухсекционной центральной обмотки по боковому полюсу $\frac{1}{2}$ также можно пропускать только один из токов, только теперь уже имеет значение какой именно. В этом случае поле будет зависеть от токов в каждой из секций с коэффициентами K_1 и K_2 , зависящих от числа витков в этих секциях:

$$B = B_0 + K_1 \cdot I_1 + K_2 \cdot (I_1 + I_2) \tag{3.13}$$

Рассмотрим для простоты короткий вигглер, состоящий только из одного центрального полюса с двухсекционными обмотками и боковой обмоткой ½, как показано на Рисунке 66. Для наглядности можно считать, что зануление первого интеграла поля на длине L вдоль всего вигглера $I_{first} = \int_0^L B_z(s) ds$ достигается перераспределением величины поля B_z между центральным и боковыми полюсами таким образом, чтобы площади разной полярности под кривой поля стали равны между собой. Так как токи протекают одновременно по всем трём полюсам, то с увеличением поля в боковом полюсе, так же увеличивается поле и в центральном, уменьшая тем самым чувствительность регулировки и управляемость интеграла. Поэтому, с точки зрения большей чувствительности (большее изменение интеграла при меньшем изменении тока) выгоднее запитывать боковой полюс тем током, который бы меньше влиял на поле в центральном полюсе. В нашем случае, в соответствие с формулой (3.13), это должен быть ток I_2 .

3) В случае использования боковых полюсов ¼ и ¾ и односекционной центральной обмотки, как изображено на Рисунке 67, число возможных способов запитки токами увеличивается. Но, следуя предыдущей логике, наибольшая чувствительность к настройке интеграла будет наблюдаться при запитке бокового полюса ¼, имеющего то же направление поля, что и в центральном полюсе, любым из двух токов I_1 или I_2 , а полюса ³/₄, создающим поле в обратном направлении, вторым из них. При этом, согласно формуле (3.12), поле на центральном полюсе будет одинаково чувствительно к изменению любого их этих токов.





Рисунок 66. Распределение поля вдоль короткого вигглера с одной центральной обмоткой и боковыми полюсами с полем 1/2.

Рисунок 67. Распределение поля вдоль короткого вигглера с одной центральной обмоткой и боковыми полюсами с полем ¹/₄ и ³/₄.

4) Для варианта, когда имеется двухсекционная центральная обмотка и боковые полюса ¹/₄ и ³/₄ с точки зрения чувствительности интеграла так же выгодно запитывать каждую из боковых обмоток по отдельности одним из имеющихся токов I_1 или I_2 . Но в данном случае уже становится важно, каким именно. Так как, судя по формуле (3.13), компенсирующее (и мешающее настройке интеграла) влияние тока I_2 на поле центрального полюса будет меньше, чем у тока I_1 , то именно током I_2 выгодно запитывать полюс ³/₄. Знак поля у полюса ³/₄ имеет противоположное значение с центральным полюсом (см. Рисунок 67) и поэтому локальное изменение поля на нем эффективно смещает площадь под кривой распределения полю а ³/₄, а ток I_1 для полюса ¹/₄.

5) Можно также, в случае двухсекционной обмотки, запитывать боковые полюса $\frac{1}{2}$ и суммарным током ($I_1 + I_2$). В этом случае чувствительность регулировки интеграла будет ниже. Например, в рассматриваемом вигглере для накопителя Сибирь-2 была использована именно эта схема, как попытка скомпенсировать возможные нестабильности источника питания для увеличения стабильности интеграла и, соответственно, орбиты электронного пучка. Полная схема коммутации представлена Рисунке 68.

Идея состояла в том, что любые изменения токов в источниках питания синхронно меняют уровень поля, как в центральном полюсе, так и в боковом полюсе ¹/₂ и, соответственно, интеграл вигглера меняется не очень сильно. При

114

этом осознавалось, что чувствительность управления интегралом также уменьшится, так как изменение соответствующих площадей под графиком продольного распределения поля (см. Рисунок 68), будет определяться теперь только различием числа витков в обеих секциях центрального полюса (см. формулу (3.13)) и боковом полюсе ¹/₂.



Рисунок 68. Схема коммутации и защиты обмоток 7.5 Тл 21-полюсного вигглера для накопителя Сибирь-2.

Такой подход, с одной стороны, увеличил стабильность положения орбиты, но, с другой стороны, привёл к ошибке, для исправления которой потребовался дополнительный источник питания с отрицательной полярностью. Дело в том, что расчёты соотношения токов на обмотках, соответствовавшим нулевому интегралу магнитного поля в вигглере, были проведены в данном случае не для всего диапазона полей, а только для низкого уровня поля ~0.3 Тл и высокого, начиная с ~4 Тл. При этом подгонка токов в промежуточных областях поля не проводилась. Однако во время проведения испытаний на реальном магните при подгонке соотношения токов I_1 и I_2 выяснилось, что, благодаря эффектам насыщения железа, для выполнения условия равенства нулю интеграла на участке поля 0.3 – 4 Тл необходимо было подавать ток I₂ с обратной полярностью для компенсации этих эффектов. Наличие отрицательной области тока I₂ изображено на графиках зависимости токов в обмотках от величины основного поля (см. Рисунок 69), соответствующих нулевому интегралу. На графиках токов легко также заметить два характерных излома, на поле ~1.6 Тл и ~2.3 Тл, соответствующих переходам в насыщенное состояние сначала центрального, а затем и бокового полюса 1/2, соответственно, после которых зависимость становится линейной. Отметим, что при использовании схемы с боковыми катушками ¹/₄ и ³/₄ будет наблюдаться уже три таких излома, соответствующих последовательному насыщению трёх видов полюсов. В качестве примера, теперь уже правильного распределения токов в обмотках, можно привести зависимость токов от поля при запитке 27-полюсного 4 Тл вигглера, установленного ИЯФ СО РАН на накопителе Canadian Light Source (CLS) в 2007 году [136], изображённую на Рисунке 70. Здесь легко заметить, что оба источника питания имеют только положительное направление.





Рисунок 69. График токов, для нулевого интеграла в 7.5 Тл 17полюсного вигглере. Один из токов имеет отрицательную полярность на участке 0.3 – 4 Тл.

Рисунок 70. Токи, соответствующие нулевому интегралу, в 27-полюсном 4 Тл вигглере для накопителя CLS (Канада).

Из рассмотренных особенностей зануления интегралов в многополюсных вигглерах можно сделать вывод, что, в отличие от обычных тёплых магнитов, в которых обычно выбирается режим работы до начала насыщения, учёт этого эффекта в расчётах сверхпроводящих магнитов, где железо почти всегда является насыщенным, требует очень аккуратного рассмотрения.

3.1.2.2. Зануление интегралов поля в многополюсных вигглерах с помощью натянутой проволочки с током

Магнитное поле вигглера при установке его на действующий накопитель не должно влиять на орбиту электронов вне вигглера и создавать помехи на экспериментальных станциях, где проводится работа с синхротронным излучением. Как следует из выражений (1.6) и (1.7), это требование сводится к тому, чтобы поле вигглера не изменяло горизонтальный угол и координату электронного пучка. Иными словами, необходимо минимизировать величину первого и второго интегралов магнитного поля вдоль траектории пучка внутри вигглера. При этом распределение токов в обмотках вигглера изначально проектируется таким образом, чтобы на любом уровне поля должны обязательно существовать такие токи в каждом из двух источников питания вигглера, при которых первый интеграл зануляется. требования, потребовавший Результат несоблюдения ЭТОГО использования дополнительного источника тока с отрицательным направлением для компенсации был описан в Главе 3.1.2.1 и в работе [137]. эффектов насыщения железа, Отметим, что при нечётном числе центральных полюсов величина второго интеграла не поддаётся коррекции с использованием только двух основных источников тока и определяется только симметрией, достигнутой при изготовлении и сборке магнитной системы. Особенности зануления интегралов поля в вигглерах с чётным числом полюсов представлены в работах [149, 150].

Величины токов, соответствующих нулевому значению первого интеграла важно знать ещё до установки вигглера на накопитель. Подгонку токов источников питания для зануления первого интеграла поля традиционно производят с помощью, например, датчиков Холла. При этом выставляется некоторое расчётное значение токов в источниках питания и производится снятие горизонтальной карты поля с некоторым шагом. По измеренным значениям вычисляется траектория пучка в этом поле, затем производится интегрирование магнитного поля вигглера по этой расчётной траектории. Если полученная таким образом величина первого интеграла недостаточно близка к нулю, то производится коррекция токов и цикл измерений повторяется. Таким образом, проведя несколько итераций можно найти искомые значения токов. Такой традиционный метод является достаточно трудоёмким и требует значительных затрат времени, если учесть, что измерения необходимо провести на разных уровнях магнитного поля вигглера и с достаточно подробным шагом по величине поля.

Другим способом измерения магнитного поля может являться многовитковая катушка, на которой наводится напряжение при сканировании магнитного поля, и сигнал с катушки измеряется интегратором. Пример использования такой измерительной системы в погружном криостате с жидким гелием для измерения карты поля одного из сверхпроводящих вигглеров, созданных в ИЯФ СО РАН, представлен в работе [98]. Этот метод измерения, однако, обладает теми же недостатками, что и при измерениях датчиками Холла, так как требуется проводить несколько длительных подгоночных измерений.

Поэтому для зануления первого интеграла поля на всех многополюсных вигтлерах, созданных в ИЯФ СО РАН, был использован другой, более простой и удобный способ – метод натянутой проволочки с током. Этот метод более подробно был описан в работах [96, 103, 103, 120 и 132] и основан на том, что поведение проволочки с током в магнитном поле совпадает с поведением электронного пучка с соответствующей энергией, находящегося в таком же поле. В общем случае, отклонение тонкой проволочки с током, натянутой в магнитном поле, можно описать выражением:

$$EJ\frac{d^4x}{ds^4} + T\frac{d^2x}{ds^2} = I \cdot B(s)$$
(3.14)

где:

Е-модуль Юнга проволоки,

J - момент инерции проволоки,

I - ток в проволочке,

Т- сила натяжения проволочки,

B(s) - магнитное поле вдоль вигглера.

Для нашего случая первым слагаемым в выражении (3.14), которое отвечает за жёсткость провода, можно пренебречь по сравнению со вторым. После этого выражение (3.14) становится похожим на уравнение движения заряженной частицы в магнитном поле:

$$\frac{d^2 x}{ds^2} = \frac{I \cdot B(s)}{T} - для проволочки с током$$
(3.15)

$$\frac{d^2 x}{ds^2} = \frac{B(s)}{B\rho}$$
 - для заряженной частицы (3.16)

Для равенства этих двух выражений необходимо удовлетворить следующему условию:

$$B\rho = \frac{T}{I} \tag{3.17}$$

Применительно, например, к 17-полюсному 7 Тл вигглеру для накопителя BESSY-II, имеющему энергию электронов 1.9 ГэВ, значение $B\rho = 6.3T \pi \cdot M$, ток в проволочке был выбран I = 2A, а соответствующее ему натяжение проволочки T = 12.6H. Отметим, что ток в проволочке был выбран максимально возможный с точки зрения не расплавления её электрическим током. Для измерений была выбрана тонкая сверхпроводящая проволочка диаметром 0.3 мм, в которой сверхпроводящие жилы из Nb-Ti находятся в медной матрице. Таким образом, прочные Nb-Ti жилы позволяют проложить к проволочке значительное натяжение, а медная оболочка, в свою очередь, даёт возможность пропускать достаточно большой электрический ток. Следовательно, уменьшается как провисание проволочки, так и систематическая ошибка, вносимая в измерения собственной жёсткостью проволочки Е. J. Решение уравнения (3.14) с учётом первого слагаемого, представленное в работе [96] показало, что при максимальном отклонении проволочки ~20 мм вклад жёсткости проволочки не превышает ~0.025 мм. Так как для описываемого 7 Тл 17-полюсного вигглера максимальное отклонение орбиты пучка составляет 0.6 мм, следовательно, этой поправкой можно пренебречь.

Способ измерения описанным методом схематично изображён на Рисунке 71. Проволочка общей длиной 6 м и натянутая с силой *T* = 12.6*H* и с протекающим через неё током I = 2A, проходит внутри «тёплой» вакуумированной трубки, вставленной в «холодный» лайнер. Один конец проволоки зафиксирован, а ко второму её концу, переброшенному через свободно вращающийся ролик, подвешен груз. Оба места закрепления проволочки установлены на прецизионные двухкоординатные подвижки, позволяющие настраивать положение проволочки в плоскости, поперечной оси вигглера. На обоих концах промежутка, симметрично D_1 и D_2 , измеряющие отклонение проволочки в установлены датчики горизонтальной плоскости. Датчики установлены симметрично, относительно центра вигглера на расстоянии 1м и равноудалены от концов проволочки $(L_1 = L_2 = 2M)$. Пространственное разрешение датчиков, регистрирующих смещение проволочки, составляет ~5 мкм [120].



Рисунок 71. Условная схема метода зануления интегралов поля с использованием натянутой проволочки с током (вид сверху).

Если токи в обмотках вигглера разбалансированы, то величину первого интеграла поля (см. выражение (1.6)) можно вычислить как:

$$I_{first} = \frac{T}{I} \left(\frac{\delta x_1}{L_1} + \frac{\delta x_2}{L_2} \right), \tag{3.18}$$

где δx_1 и δx_2 - отклонения проволочки, измеренные датчиками D_1 и D_2 . В таком случае условие зануления первого интеграла будет выглядеть как:

$$\frac{\delta x_1}{L_1} + \frac{\delta x_2}{L_2} = 0 \tag{3.19}$$

Следовательно, условие равенства нулю первого интеграла можно интерпретировать как равенство нулю угла, вносимого магнитным полем вигглера в траекторию пучка. Таким образом, зануление первого интеграла сводится к такой подгонке токов в источниках, чтобы минимизировать сумму δx_1 и δx_2 .

Так как для рассматриваемого накопителя BESSY-II эмиттанс $\varepsilon_x \approx 7 \cdot 10^{-9} \, \text{м} \cdot pad$, β – функция в месте установки вигглера $\beta_x = 0.74 \, \text{м}$, то, как следует из выражений (1.10) и (1.11) максимально допустимые значения для $\delta \beta$ и δx можно оценить как:

$$\delta \vartheta \le 2\sin(\pi v_x) \sqrt{\frac{\varepsilon_x}{\beta_x}} \approx 0.12 \text{ mpad}$$
(3.20)

$$\delta x \le 2\sin(\pi \nu_x) \sqrt{\varepsilon_x \beta_x} \approx 0.086 \text{MM} \tag{3.21}$$

Это соответствует интегралам магнитного поля I_{first} и I_{second} :

$$I_{first} \le 7.6 \cdot 10^{-4} T_{\pi} \cdot M \quad M \quad I_{sec \, ond} \le 5.4 \cdot 10^{-4} T_{\pi} \cdot M^2$$
(3.22)

Ошибка зануления определяется пространственным разрешением датчиков положения (5 мкм) и не превышает $\delta I_{first} \leq 3 \cdot 10^{-5} T_{\pi} \cdot M$. Такая точность является заведомо подходящей, если учесть, что максимальное значение первого интеграла для накопителя BESSY-II, как следует из выражения (3.22) не должно превышать $I_{first} \leq 7.6 \cdot 10^{-3} T_{\pi} \cdot M$.

Значение второго интеграла поля (см. выражение (1.7)) можно вычислить как:

$$I_{\text{sec ond}} = \frac{T}{I} \left(\delta x_1 - \delta x_2 \right) \tag{3.23}$$

Величина второго интеграла, пропорциональная разности отклонений проволочки с обоих сторон вигглера, определяет общее горизонтальное смещение пучка, которое появляется при прохождении им участка с вигглером. Величину второго интеграла нельзя изменить подгонкой токов источников, так как она зависит только от несимметрии изготовления и сборки вигглера. Таким образом, после подгонки токов для зануления первого интеграла было измерено оставшееся значение второго интеграла, которое оказалось $I_{second} \leq 5 \cdot 10^{-5} T_{\pi} \cdot M^2$ что заведомо меньше требуемого из выражения (3.22) $I_{second} \leq 5.4 \cdot 10^{-4} T_{\pi} \cdot M^2$. На Рисунке 72 представлено измеренное значение второго интеграла для всего диапазона рабочих полей, из которого можно заключить, что при изготовлении магнитной системы вигглера было достигнуто хорошее качество сборки, обеспечившее достаточную симметрию магнитной системы.

На Рисунке 73 представлены результаты экспериментальной подгонки токов для минимизации первого интеграла *I*_{first} для различных уровней поля вигглера. Во время первого включения вигглера на накопителе BESSY-II подтвердилось, что при установке в источниках питания токов, измеренных описанным выше способом, положение пучка в накопителе находилось в заданных пределах.





Рисунок 72. Измеренное значение второго интеграла 7 Тл 17-полюсного вигглера ВЕSSY-II.

Рисунок 73. Токи в обмотках, при которых соблюдается равенство нулю первого интеграла поля.

Таким образом, был предложен и использован простой и удобный метод подгонки значения интеграла поля, преимуществом которого, в отличие от традиционных методов, является:

 Простота конструкции и отсутствие таких сложных механических устройств, как прецизионная направляющая и система движения для каретки с измерительными датчиками (например, датчиками Холла);

- Значительная экономия времени измерения (например, для получения графика токов, изображённого на Рисунке 73 для различных уровней поля с шагом 0.5 Тл понадобилось всего несколько часов;
- Возможность наблюдать в динамике за значением интеграла непосредственно в процессе подъёма поля;
- 4. Так как форма изгиба проволочки в магнитном поле точно совпадает с траекторией электронного пучка с соответствующей энергией, то не требуется дополнительно вычислять как поле на траектории пучка, так и саму траекторию.

3.1.3 15-полюсный 7.5 Тл вигглер для LSU-CAMD

Источник синхротронного излучения CAMD (Center for Advanced Microstructures and Devices), работающий на базе LSU (Louisiana State University) в США с 1992 года, первоначально был ориентирован на исследования и изготовление микроструктур на основе рентгеновской микролитографии. Это источник второго поколения, имеющий рабочую энергию всего 1.3 ГэВ при энергии инжекции 0.18 ГэВ и низкую характеристическую энергию квантов ~1.6 КэВ, излучаемых поворотными магнитами с полем 1.48 Тл. В 1997 году, благодаря установке на него трёхполюсного шифтера с полем 7 Тл (так же созданного в ИЯФ СО РАН [95, 97, 114]), который сместил критическую энергию фотонов до 7.95 КэВ и продлил спектр излучения в жёсткую область до ~30 КэВ, были расширены возможности для исследований как ультра-глубокая рентгенолитография, протеиновая таких кристаллография, рентгеновская томография и других. Полный горизонтальный угол излучения из шифтера величиной ~ 200 мрад позволил установить 3 полноценных канала вывода излучения. Однако к 2009 назрела необходимость дополнительно расширить возможности этого источника установкой второго вставного устройства [53], так как плотность потока квантов уже не удовлетворяла новым требованиям экспериментов. Ввиду того, все резервы по модернизации магнитной структуры накопителя уже были исчерпаны [54, 55], единственным вариантом решения проблемы увеличения яркости излучения в требуемом диапазоне

могла стать установка многополюсного вигглера с высоким уровне поля ~7.5 Тл и максимально возможным количеством полюсов, которой и был создан в ИЯФ СО РАН для установки на источник САМD в 2013 году [147, 148, 151 и 152]. Благодаря увеличившемуся потоку фотонов (см. Рисунок 74), с помощью данного вигглера теперь стали доступны такие эксперименты, требующие большого потока жёстких рентгеновских квантов, как томография, протеиновая кристаллография, рентгеновская спектроскопия и рентгеновская литография. Полная мощность излучения при энергии электронного пучка 1.3 ГэВ и токе 0.2 А в горизонтальный угол ± 60 мрад составляет ~ 17 кВт. Спектральное распределение потока синхротронного излучения вигглера для различных энергий фотонов представлено на Рисунке 75.







Рисунок 75. Угловое спектральное распределение потока фотонов от 7.5 Тл 15-полюсного вигглера для LSU-CAMD.

Конструкция данного вигглера, представленная на Рисунке 76, во многом схожа с предыдущим вигглером для накопителя Сибирь-2, однако по своим физическим размерам и величине запасённой энергии он является самым крупным на сегодняшний день сверхпроводящим вигглером не только из всех вставных устройств, созданных в ИЯФ СО РАН, но и во всем мире. Внешний вид собранного вигглера перед установкой на накопитель представлен на Рисунке 77.



Рисунок 76. Конструкция 7.5 Тл 15-полюсного вигглера LSU-CAMD.



Рисунок 77. Внешний вид криостата 7.5 Тл 15-полюсного вигглера LSU-CAMD.

Специфика конструкции этого вигглера определяется с одной стороны, высоким уровнем магнитного поля 7.5 Тл, которое необходимо с точки зрения расширения спектральных характеристик излучения вплоть до ~60 КэВ, а с другой – жёсткими ограничениями, связанными с характеристиками уже устаревшего накопителя. Поэтому была проведена глубокая модификация магнитной оптики кольца, специально направленная на улучшение условий для установки данного вигглера.

Этапы подготовки магнитной структуры накопителя САМД для установки второго вигглера более подробно представлены в работе [56]. Однако даже после такой подготовки минимально возможная вертикальная апертура для пучка все равно составила не менее 15 мм, что автоматически потребовало как большого магнитного зазора g, так и длинного периода λ_0 для получения необходимого уровня поля. Проведённая оптимизация по количеству периодов вигглера λ_0 с полем на орбите $B_0 = 7.5$ Тл для нахождения максимума функции (2.18) по методике, изложенной в Главе 2.1 показала, что для максимального потока фотонов для критической энергии $\varepsilon_c = 8.53$ КэВ потребуется использование 11 полюсов с максимальным полем 7.5 Тл и периодом ~194 мм, что, совместно с боковыми корректирующими полюсами с полем ¹/4 и ³/4, привело к общей длине магнитной структуры вигглера, равной ~1600 мм. Такое сочетание основных магнитных параметров вигглера и низкой энергии пучка ($E = 1.3 \ \Gamma \Rightarrow B$) привело к сильному отклонению траектории электронного пучка, при котором горизонтальная апертура быть не менее ~200 мм, во избежание на выходе должна была попадания собственного излучения вигглера на стенки его вакуумной камеры. Это наглядно видно из графика распределения мощности излучения по горизонтальному углу на Рисунке 78 и из Рисунка 79, где представлено расчётное распределение мощности излучения по горизонтальной координате на уровне выходного фланца вигглера.



Рисунок 78. Угловое распределение мощности излучения 15 - полюсного 7.5 Тл вигглера (*E* = 1.3 ГэВ, *I* = 0.2 A, B = 7.5 Тл).



Рисунок 79. Распределение мощности излучения по горизонтали на выходном фланце 15 - полюсного 7.5 Тл вигглера ($E = 1.3 \Gamma$ эВ, I = 0.2 A, B = 7.5 Тл).

Соответствующее расчётное распределение магнитного поля, а также отклонение орбиты и изменение угла траектории вдоль оси вигглера при энергии $E = 1.3 \ \Gamma$ эВ, токе $I = 0.2 \ A$ и поле B = 7.5 Тл) представлено на Рисунке 80, Рисунке 81 и Рисунке 82, соответственно.



Рисунок 80. Продольное распределение магнитного поля вдоль оси 15-полюсного 7.5 Тл вигглера для LSU-CAMD ($E = 1.3 \ \Gamma \Rightarrow B$, $I = 0.2 \ A$, $B = 7.5 \ T_{J}$).



Рисунок 81. Отклонение орбиты вдоль оси 15-полюсного 7.5 Тл вигглера для LSU-CAMD ($E = 1.3 \ \Gamma \Rightarrow B, I = 0.2 \ A, B = 7.5 \ Tл$).



Рисунок 82. Угловое отклонение вдоль оси 15-полюсного 7.5 Тл вигглера для LSU-CAMD ($E = 1.3 \ \Gamma_{9}B$, $I = 0.2 \ A$, $B = 7.5 \ T_{7}$).

Для достижения требуемой величины пикового магнитного поля и остальных сопутствующих параметров единственно возможным вариантом по устройству межполюсного зазора вигглера был отказ от использования тёплой камеры для пучка. Вместо этого в качестве вакуумной камеры были использованы стенки гелиевого сосуда из нержавеющей стали, а для перехвата тепловой нагрузки от пучка в жидкий гелий был применён медный лайнер. Для обеспечения необходимой механической прочности такой широкой гелиевой камеры (~ 250 мм) с точки зрения высокого давления газа, возникающего в сосуде при испарении жидкого гелия после потере сверхпроводимости, а также для того, чтобы медный лайнер шириной ~200 мм сделать устойчивым к воздействию пондеромоторных сил во время потери сверхпроводимости, толщина и форма стенок этих элементов были оптимизированы и, таким образом, минимально возможный магнитный зазор составил 25.2 мм, как показано на Рисунке 83. В итоге, размер области, занимаемой магнитным полем, вырос настолько, что величина общей накопленной энергии вигглера на максимальном поле составила 0.85 МДж и поэтому отдельной важной задачей стала как защита обмоток вигглера от разрушения при потере сверхпроводимости, так и вывод накопленной энергии из магнита.



Рисунок 83. Сечение межполюсного зазора вигглера LSU – CAMD.

Центральные полюса магнита имеют форму горизонтального рейстрека и разбиты на две секции, запитанные оптимальными токами. Обмотки изготовлены из Nb-Ti провода диаметром 0.92 мм, включая лаковую изоляцию. Соотношение сечения меди и сверхпроводника в проводе равно 0.43 и критический ток составляет 380А в магнитном поле 7 Тл. Оптимизация распределения витков и слоёв в обмотках была проведена с точки зрения получения максимально возможного уровня магнитного поля при минимально возможном периоде магнитной структуры таким образом, чтобы минимизировать запас энергии, который неизбежно имеет в таком вигглере очень высокое значение. Критерием максимально достижимого уровня поля являлось ограничение по току используемого провода в геометрических точках с максимальной концентрацией поля, которые на катушках типа рейстрек находятся на первых слоях обоих секций в районе поворота. Наилучшие параметры обмотки для магнитного зазора 25.2 мм и периода 200 мм составили 13 слоёв на первой секции и 15 слоёв на второй секции с 70 витками в каждом слое. Для поля на орбите 7.5 Тл токи составили 150 А в первой секции и 340 А во второй секции. Расчётное распределение магнитного поля на повороте внутренней и наружной секции вдоль вертикальной координаты представлено на Рисунке 84 и Рисунке 85, соответственно.





LSU-CAMD на радиусе 1 секции вдоль вертикальной оси z (В [кГс], z [см]).

Рисунок 84. Расчётное распределение Рисунок 85. Расчётное распределение магнитного поля в обмотке вигглера магнитного поля в обмотке вигглера LSU-CAMD на радиусе 2 секции вдоль вертикальной оси z (В [кГс], z [см]).

На Рисунке 86 представлены рабочие точки наружной и внутренней обмоток и нагрузочная кривая использованного сверхпроводящего провода. Из расчётного поперечного распределения поля, представленного на Рисунке 87, можно увидеть, что поперечный развал поля не превышает 0.01% на ширине ±20 мм.



Рисунок 86. Расположение рабочих точек на внутренней и наружной секциях, обмоток, относительно критической кривой сверхпроводящего провода.

130



Рисунок 87. Расчётное поперечное распределение магнитного поля на центральном полюсе вигглера LSU-CAMD.

Внешний вид нескольких готовых центральных полюсов, каждый из которых имеет наружные габариты 360мм х 100 мм х 90 мм и вес ~ 20 кг, представлен на Рисунке 88. Основные характеристики вигглера приведены в Таблице 3.6.



Рисунок 88. Внешний вид центральных готовых полюсов вигглера LSU-CAMD.

Поле на оси вигглера (Рабочее/Максимальное), Тл	7.5/7.7
Поле на обмотке (при 7.75 Тл на оси вигглера), Тл	7.9
Длина периода, мм	193.4
Число полюсов	11+4
Магнитная длина, мм	1594
Коэффициент ондуляторности К	~136
Горизонтальная апертура (для пучка/для излучения), мм	80/200
Вертикальная апертура, мм	15
Магнитный зазор, мм	25.2
Поперечная однородность поля $\Delta B / B$ в области ± 20 мм, %	≤ 0.01 %
Токи в обмотках (внутренняя/наружная), А	143/(143+205)
Индуктивность, Гн	~ 100
Запасённая энергия, кДж	850
Расход жидкого гелия при потере сверхпроводимости, л	~ 200
Полная мощность излучения (1.3 ГэВ, 0.2 А), кВт	17
Критическая энергия фотонов (на 1.3 ГэВ), КэВ	8.53
Первый интеграл поля, Тл·м	$\pm 10^{-4}$
Второй интеграл поля, Тл·м ²	$\pm 10^{-4}$
Время подъёма поля до 7.5 Тл, мин	≤ 15

Таблица 3.6. Основные характеристики 7.5 Тл 15-полюсного вигглера для LSU-CAMD.

Что касается выбора схемы защиты обмоток при потере для сверхпроводимости, то величина полной запасённой в магните энергии 0.85 МДж не позволила объединить несколько последовательных секций, как это было сделано на вигглере на BESSY-II (см. Главу 3.1.1.4), в одну ячейку, защищённую цепочкой из пары встречно включённых холодных диодов и резистора, поглощающего энергию. Поэтому, несмотря на достаточную громоздкость такой системы защиты, пришлось создавать защитные цепочки для каждой из 52 обмоток вигглера, в результате чего общее число резисторов с сопротивлением 0.1 Ом достигло 52, а количество диодов

104. Таким образом, каждая такая цепочка защищала участок цепи, составило имеющий в среднем энергию ~ 16 кДж. Холодные диоды, которые находятся в закрытом состоянии как в режиме подъёма тока в обмотках, так и при стационарной исключают ответвление токов из обмоток в резисторы и обеспечивают работе, В стабильную управляемость интегралами поля. процессе потери сверхпроводимости на обмотках возникают как омические напряжения от растущей нормальной зоны, так и индуктивные составляющие напряжения, которые открывают диоды и часть тока из обмоток ответвляется в защитные резисторы. Схема коммутации обмоток совместно с системой защиты представлены на Рисунке 89.



Рисунок 89. Схема коммутации и защиты обмоток 15-полюсного 7.5 Тл вигглера для CAMD-LSU.

Для уменьшения энергии, выделяемой внутри жидкого гелия, была применена нормальной также И активная защита, состоящая ИЗ детектора зоны, срабатывающего при возникновении напряжения на любом из защитных резисторов и подключающего к обмоткам вигглера специальные резисторы, находящиеся снаружи криостата. Доля энергии, которую удаётся вывести на наружные резисторы, составляет около 15%. Общий вид системы защиты показан на Рисунке 90 и Рисунке 91.

134





Рисунок 90. Общий вид магнитной Рисунок 91. Внешний вид системы системы 15-полюсного 7.5 Тл вигглера защиты обмоток, состоящей из CAMD-LSU. На верхней части – система встречных диодов и резисторов. защиты обмоток.

Качество спроектированной защиты можно оценить из Рисунка 92, на котором представлено поведение напряжений на обмотках вигглера во время перехода в нормальное состояние. Здесь все напряжения на нескольких защитных резисторах смещены по времени к моменту открывания защитных диодов с порогом ~5 В. Можно заметить, что время затухания тока на резисторах не превышает ~0.7 с, а напряжение ~50 В (часть напряжений обрезано по амплитуде из-за ограничений системы регистрации). Из графиков напряжений на Рисунке 93 видно, что характерное время затухания тока в обмотках составляет менее ~ 1 с и напряжения на обмотках при этом не превышают безопасных 40 В.



Рисунок 92. Поведение напряжений на защитных резисторах при потере сверхпроводимости.



Рисунок 93. Типичное поведение напряжений на трёх соседних обмотках 15полюсного 7.5 Тл вигглера для CAMD-LSU при потере сверхпроводимости. Время затухания тока ~ 1 с и напряжения на обмотках ~40 В.

Из графика соотношения токов для разных уровней полей для обеспечения нулевого интеграла на Рисунке 94 можно заметить, что на всем диапазоне полей оба тока плавно изменяются в сторону увеличения и, в отличие от предыдущего описанного вигглера для накопителя Сибирь-2, где была допущена ошибка в расчётах, здесь используются только токи положительной полярности. На этих же графиках можно заметить и три характерных точки перегиба, связанные с насыщением всех трёх типов полюсов.

Конструкция данного криостата обеспечила такой баланс теплопритоков, что температура в сосуде с жидким гелием понизилась до 3.3 К и после отсекания от внешней атмосферы остаточное давление в сосуде составило около 0.4 бар. Соответствующее переохлаждение сверхпроводящего магнита до температуры 3.3 К, приводящее к улучшению характеристик сверхпроводящих проводов, позволило увеличить уровень максимально достигнутого магнитного поля до 7.75 Тл. На 86 Рисунке были приведены нагрузочные кривые использованного сверхпроводящего провода для температуры 4.2 и 3.3 К и рабочие точки первой и второй секций центрального полюса на различных уровнях магнитного поля. Можно заметить, что на обмотках вигглера был достигнут уровень токов, составляющий около 90% от соответствующих токов короткого образца, это хороший результат для сверхпроводящих обмоток, имеющих такие большие геометрические размеры. Высокий уровень запасённой в магните энергии, составляющий 850 кДж, приводит к полному испарению жидкого гелия из сосуда при потере сверхпроводимости в течение ~3 мин и к нагреву магнита до температуры 20 К, как можно заметить из Рисунка 95. Испарённый гелий выпускается через защитный клапан, при этом максимальное избыточное давление в сосуде не превышает 0.5 бар. На Рисунке 96 приведена история тренировки сверхпроводящего магнита на различных этапах его изготовления. Многочисленные переходы в состояние нормальной проводимости показали как механическую надёжность криостата в целом, так и адекватную работу системы вывода энергии из сверхпроводящих обмоток.

136



Рисунок 94. Соотношение токов в цепях вигглера для обеспечения нулевого интеграла на разных уровнях поля.



магнита при потере сверхпроводимости.



Рисунок 96. История тренировки 15-полюсного 7.5 Тл вигглера для LSU-CAMD на разных этапах изготовления.

Обмотки вигглера запитываются двумя независимыми источниками тока, позволяющими настраивать интегралы магнитного поля до необходимых минимальных значений. При этом величина индуктивности на малом поле, когда железо магнита ещё является ненасыщенным, составила экстремально высокую величину ~100 Гн, что, кстати говоря, несколько затруднило проводить синхронный подъем токов в индуктивно связанных обмотках вигтлера, с соблюдением нулевых интегралом поля. Выяснилось, что высокая индуктивность магнита осложняет динамическое управление интеграла ми поля на низких полях вплоть до уровня 2 Тл. Однако отклонение орбиты электронного пучка в процессе подъёма и опускания магнитного поля в вигтлере в течение ~15 мин не превысило значений, соответствующих $2 \cdot 10^{-2}$ Тл · м для первого интеграла и 10^{-3} Тл · м² для второго интеграла поля, как можно заметить из Рисунка 97. В статическом же состоянии величины первого и второго интегралов поля не превышали 10^{-4} Тл · м и 10^{-4} Тл · м², соответственно. Эти данные были измерены методом статической проволочки с током, описанным в Главе 3.1.2.2. С 2013 года вигглер работает на накопителе LSU-CAMD.



Рисунок 97. Поведение первого и второго интегралов магнитного поля при подъёме и спуске поля.

3.2. Многополюсные вигглеры со средним уровнем поля (3.5 – 4.2 Тл) и небольшим периодом (48-60мм)

Опыт создания сверхпроводящих многополюсных вигглеров показал, что наиболее востребованными оказались вигглеры со средним уровнем поля (3.5 – 4.2

Тл) и небольшим периодом (48-60 мм). Это можно объяснить тем, что сочетание параметров поля именно таких вигглеров и типичных характеристик современных накопителей – источников СИ - приводит к генерации фотонов с наиболее востребованными характеристиками, как по энергиям, так и по потоку фотонов. В Таблице 3.7 представлены основные параметры шести многополюсных сверхпроводящих вигглеров со средним уровнем поля и небольшим периодом, созданных в ИЯФ СО РАН для различных источников синхротронного излучения.

В процессе в процессе проектирования и создания этих шести устройств, первым из которых был 49-полюсный 3.5 Тл вигглер, установленный в 2003 году на накопитель ELETTRA, решалась общая задача оптимизации величины магнитного поля и периода с точки зрения получения максимального потока фотонов в требуемом участке спектра с учётом конкретных ограничений по минимально возможно апертуре для пролёта пучка. При этом основной целью всегда оставалось достижение максимально возможной (при соответствующем сочетании остальных оптимизируемых параметров) величины магнитного поля, таким образом, чтобы параметры магнитной структуры вигглера всегда находились на пределе современных возможностей. Для решения этой задачи использовалось следующие подходы:

1) Уменьшение вертикальных зазоров между апертурой, необходимой для пучка и величиной магнитного зазора путём совершенствования технологии изготовления вакуумной камеры и медного лайнера, которые должны были оставаться механически устойчивыми при минимально возможных размерах. Так, на Рисунке 98 и Рисунке 99 показано для сравнения, как был организован межполюсной зазор на первом таком 3.5 Тл вигглере для ELETTRA и на 4.2 Тл вигглере, установленном у на накопителе CLS, из которых можно заключить, что суммарный зазор между апертурой и магнитом при сходных остальных параметрах уменьшился на ~ 3 мм с 17 мм до 14 мм.

139

Таблица 3.7. Основные параметры вигглеров со средним уровнем поля и небольшим периодом, созданных в ИЯФ СО РАН.

Источник СИ,	ELETTRA,	DLS,	CLS,	LNLS,	DLS,	AS,
Энергия,	2 ГэВ	3 ГэВ,	2.9 ГэВ,	1.37 ГэВ,	3 ГэВ,	3 ГэВ,
расположение,	Италия,	Англия,	Канада	Бразилия,	Англия,	Австралия,
год,	2002	2006	2007	2009	2009	2012
публикации	[61,67,116,	[126,127]	[136,87,	[90]	[85,86]	
	117, 144]		88, 62, 89]			
Магнитное поле,	3.5 (3.7)	3.5 (3.8)	4.0 (4.3)	4.1 (4.2)	4.2 (4.3)	4.2 (4.4)
В _{раб} (В _{макс}), Тл						
Число полюсов	45+4	45+4	25+2	31+4	45+4	59+4
(осн.+бок.)						
Период, мм	64	60	48	60	48	52
Зазор магнитный	16.5 (11)	16.4 (10)	13.9(9.5)	18.2 (14)	14.4 (10)	15.2 (10)
(для пучка), мм						
Гор. апертура, мм	84	80	60	80	60	60
Магнитная	1680	1544	1000	1162	1304	1758
длина, мм						
Крит. энергия, КэВ	9.3 (1.33)	21 (0.59)	23 (0.54)	5 (2.48)	25 (0.49)	25 (0.49)
(длина волны, Å)						
Параметр К	21	19.6	19	18	18.8	18.8
Мощность, кВт	8.8	60	12	4.45	55	37.5
(ток пучка, А),	(0.2)	(0.5)	(0.2)	(0.3)	(0.5)	(0.2)
Токи в обмотках,	288	327+290	411	436	455	447
Внутр.(нар.), А	(288+210)		(411+445)	(436+414)	(455+41	(447+432)
					5)	
Кр.ток провода, А	380	520	700	520	700	700
(Ø 0.9мм, В=7 Тл)						
Запасённая	240	70	20	60	25	70
энергия, кДж						
Расход гелия, л/ч	0.45	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.03	<0(0.7 бар)





Рисунок 98. Поперечное сечение межполюсного зазора вигглера ELETTRA.

Рисунок 99. Поперечное сечение межполюсного зазора вигглера CLS.

Воспользовавшись выражением (2.12), оценим возможный прирост поля в многополюсном вигглере за счёт уменьшения зазора на величину Δg . Так, если считать период магнитной структуры λ_0 и поле на поверхности полюса B_p неизменными, то для характерного периода многополюсных вигглеров $\lambda_0 \approx 50$ мм уменьшение магнитного зазора на $\Delta g \approx 3$ мм дает прирост поля на орбите пучка:

$$\frac{\Delta B_0}{B_0} = \approx e^{-\pi \frac{\Delta g}{\lambda_0}} - 1 = e^{-\pi \frac{3 \, [\text{MM}]}{50 \, [\text{MM}]}} - 1 = 0.207 \tag{3.24}$$

Таким образом, прирост поля составит ~20% и, следовательно, оптимизация зазоров в сторону уменьшения даёт очень существенный выигрыш. Хотя, с другой стороны, дальнейшее движение в этом направлении имеет реальный физический предел, так как возникновение механического контакта между лайнером и гелиевой камерой грозит в лучшем случае повышению теплопритоков в жидкий гелий, а в худшем - преждевременной потерей сверхпроводящего состояния в обмотках.

2) Использование прогресса в производстве сверхпроводящего Nb-Ti провода, величина тока в котором выросла для провода с диаметром 0.92 мм со стандартных 360 А в поле 7 Тл в начале 2000-х до рекордных 700 А на сегодняшний день. Провод с такими уникальными параметрами выпускается в ОАО «ВНИИКП» им.Бочвара. На Рисунке 100 представлены реально достигнутые в процессе тренировки рабочие точки на обмотках нескольких вигглеров относительно нагрузочных кривых использованных сверхпроводящих проводов. Можно заметить, что большинство рабочих точек находятся на удалении не более ~10 % от критической кривой, что для обмоток в форме рэйстрек, имеющей длинные плоские участки, является хорошим результатом. Поэтому можно утверждать, что для всего набора использованных сверхпроводящих проводов были получены предельные параметры для достижения максимально возможного поля. Исключение составляет вигглер ELETTRA, в котором расчёт рабочих параметров обмоток был произведён не оптимально. В результате не была использована в полной мере токонесущую способность использованного провода, что легко заметить по большому удалению рабочих точек от соответствующей нагрузочной кривой. В Таблице 3.8 представлены экспериментальные данные по максимальным достигнутым при тренировке токам и соответствующим уровням магнитных полей в критических точках обмоток.



Рисунок 100. Положение рабочих точек на обмотках нескольких сверхпроводящих вигглеров со средним периодом относительно нагрузочных кривых использованных сверхпроводящих проводов.

Название	Первая секция Е		Вторая секция		Максимальное	Ток
вигглера	Ток,	Поле на	Ток,	Поле на	поле на оси	провода в
	А	обмотке, Тл	А	обмотке, Тл	вигглера, Тл	7 Тл, А
ELETTRA	215	6.6	498	4.65	3.5	380
DLS-1	680	5.5			3.8	550
CLS-2	430		900		4.2	700
LNLS	450	7.2	900	5.4	4.2	520
DLS-2	430	7.3	900	5.4	4.3	700
AS	436	7.3	875	5.7	4.2	700

Таблица 3.8. Экспериментальные данные по максимальным достигнутым токам и соответствующим уровням магнитных полей в критических точках обмоток.

3) Использование прогресса в производстве криокулеров, в которых холодильная мощность на второй 4 К ступени выросла с начала 2000-х с первоначальных 0.5 Вт до 1.5 Вт на модели SRDK-415. Одновременное совершенствование криогенной системы вигглеров путём перехвата теплопритоков на ступени криокулеров (о чем будет подробнее описано в Главе 4), позволило получать пониженное остаточное давление в гелиевом сосуде до 0.4 бар и соответствующее падение температуры, позволившее поднять уровень максимального магнитного поля за счёт смещения токовых характеристик проводов.

На Рисунке 101 показано, какой реальный выигрыш можно получить за счёт смещения токовых характеристик, например, для провода с номинальным током 700 А в поле 7Тл, при переохлаждении его до температуры 3.2 К. В этом случае появляется возможность дополнительно поднять токи на обоих секциях на несколько десятков ампер. Так, например, на обмотках вигглера САТАСТ (ANKA-KIT, Германия) с номинальным полем 2.6 Тл было достигнуто разрежение в гелиевом сосуде на уровне 0.4 бар, что соответствует температуре кипения гелия 3.3K, как видно из фазовой диаграммы гелия на Рисунке 102. В результате токовые

характеристики провода сместились и было получено повышенное магнитное поле на уровне 2.85 Тл, как показано на Рисунке 103.

Дополнительное преимущество от работы с пониженным относительно атмосферного давлением состоит в том, что в вигглере с относительно небольшой запасённой энергией (например, ~30 кДж) удаётся при потере сверхпроводимости, благодаря разрежению в сосуде, удержать давление ниже уровня открывания клапана, сбрасывающего гелий в атмосферу, и, таким образом, сохранить гелий во время выхода из сверхпроводящего состояния, как показано на Рисунке 104, где абсолютное давление в гелиевом сосуде выросло скачком с 0.4 бар до 0.8 бар и стало вновь снижаться.



Рисунок 101. Смещение токовой характеристики сверхпроводящего провода при переохлаждении до 3.2 К, позволяющее сместить рабочие точка на обмотках и получить повышенное поле.



Рисунок 102. Фазовая диаграмма гелия.




Рисунок 103. История тренировки 2.6 Тл вигглера САТАСТ. Максимум поля 2.85 Тл при 3.3 К.

Рисунок 104. Поведение давления в криостате с пониженным относительно атмосферного давлением в момент потери сверхпроводимости.

4) Повышение устойчивости обмотках сверхпроводящего состояния В посредством, так называемого, метода внешнего легирования высоко-теплоёмкими добавками на основе гадолиния [91], при котором несколько объёмных процентов мелкодисперсного порошка вносились пространство В межвитковое смеси с эпоксидной смолой. сверхпроводящей обмотки в Такая добавка, теплоёмкость которой при температуре жидкого гелия почти в 600 раз превосходит позволила решить проблему преждевременной потери теплоёмкость меди, сверхпроводимости, которая происходила при инжекции электронного пучка в накопитель, так как введение такой добавки при 4.2 К привело к девятикратному увеличению средней объёмной теплоёмкости легированной обмотки. Таким веществом в данном случае был оксисульфид гадолиния (Gd₂O₃S), теплоёмкость которого имеет резко выраженный пик на температуре 5 К, что очень близко к рабочей температуре Nb-Ti сверхпроводника. График зависимости теплоёмкости Gd₂O₃S, в сравнение с другими часто используемыми материалами, представлен на Рисунке 105. Интересно отметить, что теплоёмкость этого уникального вещества в 220 раз превосходит теплоёмкость Nb-Ti, в 300 раз теплоёмкость компаунда и почти на три порядка больше теплоёмкости меди. Для проверки стабилизирующих свойств оксисульфида гадолиния был проведён эксперимент, в котором на коротком прототипе вигглера CLS были одновременно использованы катушки, намотанные

одинаковым проводом с характеристиками (700 A в поле 7 Tл), но пропитанные компаундом с двумя типами наполнителей - Al_2O_3 и Gd_2O_3S , причём все катушки были расставлены равномерно по всему магниту. В процессе тренировки производилась регистрация многоканальным осциллографом, какая именно из катушек потеряла сверхпроводимость первой в процессе подъёма поля. Выяснилось, что катушки, в которых использовался Gd_2O_3S , действительно переходили в нормальное состояние в ~4 раза реже, что показывало большую устойчивость, по сравнению с обычным наполнителем. Результаты эксперимента представлены на Рисунке 106.





Рисунок 105. Теплоёмкость некоторых материалов при криогенных температурах.

добавки особенно Использование высоко-теплоёмкой полезно для многополюсных вигглеров, так как при большом количестве катушек можно значительно ускорить время тренировки и выхода на максимальное рабочее поле. Этот наполнитель был использован для изготовления катушек полноразмерного 4 Тл 27-полюсного вигглера, установленного на накопителе CLS. Нужно отметить, что в данном случае это был уже второй вигглер, установленный ИЯФ СО РАН на накопитель CLS. Однако первый из вигглеров, катушки которого были изготовлены из традиционно используемого наполнителя Al₂O₃ за несколько лет эксплуатации был принудительно выведен из сверхпроводящего состояния около 500 раз во время инжекции и незапланированных сбросов электронного пучка. Использование

 Al_2O_3).

наполнителя Gd_2O_3S в обмотках вигглера второго вигглера, установленного на накопителе CLS и имеющего сходные условия по радиационной нагрузке с первым, значительно снизило вероятность внезапных переходов вигглера в нормальнопроводящее состояние при сбросах и инжекции пучка[136]. Данный вигглер, внешний вид и магнитная система которого показана на Рисунке 107, работает с 2007 года на канале BioMedical Imaging and Therapy (BMIT), на котором производятся эксперименты по исследованию и терапии рака.





Рисунок 107. Внешний вид половинок магнита во время сборки, готового магнита и криостата 27 полюсного 4.2 Тл вигглера CLS (Канада).

Ввиду того, что спектральный диапазон, в котором происходит генерация синхротронного излучения при установке данной группы вигглеров на накопитель, особенно востребован пользователями, то каналы вывода для работы с излучением имеют очень широкий спектр применения. Так, например, 4.2 Тл 49-полюсный вигглер, внешний вид которого показан на Рисунке 108, с 2009 года используется на накопителе DLS для неразрушающего радиационного контроля таких элементов конструкции самолётов, как лопатки турбин. Благодаря жёсткому спектру излучения высокой интенсивности, имеющему хорошую проникающую способность, на этом

же канале возможно проведение совсем уже экзотических экспериментов. Так, например, в работе [57] представлено быстрое рентгеновское кино, в котором было заснято в режиме реального времени движение внутренних частей работающего мотоциклетного двигателя внутреннего сгорания.



Рисунок 108. Внешний вид половинок магнита во время сборки, готового магнита и криостата 49-полюсного 4.2 Тл вигглера DLS (Англия).

На накопителе Australian Synchrotron (AS) 63-полюсный 4.2 Тл вигтлер (см. Рисунок 109), специально оптимизированный на получение максимально возможного потока квантов с энергией до 150 КэВ, является главным элементом исследовательского биомедицинского центра IMBL (Medical Beamline), на котором проводится терапия рака под воздействием очень многообещающей микропучковой радиационной методики (Micro-beam Radiation Therapy). На Рисунке 110 представлены спектральные характеристики этого вигглера, а на Рисунке 111 показана часть 138-метрового канала вывода излучения из этого вигглера, которое транспортируется по высоковакуумному каналу диаметром 100 мм в специально построенное отдельное здание медицинского центра.



Рисунок 109. Внешний вид половинок магнита во время сборки, готового магнита и криостата 63-полюсного 4.2 Тл вигглера на накопителе AS (Мельбурн).





Рисунок 111. Внешний вид 138метрового канала вывода излучения для микро-пучковой радиационной терапии на накопителе Australian Synchrotron.

Рисунок 110. Спектральная яркость излучения 63-полюсного 4.2Tл вигглера AS.

Как уже отмечалось ранее, использование многополюсных вигтлеров даёт уникальные возможности для продления жизни источников, имеющих не самые

современные параметры. Так, при установке 4.1 Тл 35-полюсного вигглера (см. Рисунок 112) на источник излучения LNLS (Кампинас, Бразилия) с энергией 1.37 ГэВ доступный для исследований диапазон был расширен до энергии квантов 30 КэВ, а на энергиях 10 КэВ и 20 КэВ поток квантов был увеличен в 20 и 1000 раз, соответственно. Таким образом, спектральный поток генерируемых фотонов позволил проводить на этом накопителе такие эксперименты, как рентгеновская дифракция и спектроскопия, что не было бы доступно, если использовать излучение из поворотных магнитов. Дополнительный прирост магнитного поля до 4.2 Тл был получен после модернизации криогенной системы этого вигглера в 2014 году для получения в нем пониженного относительно атмосферного давления.



Рисунок 112. Внешний вид центральной катушки, магнита во время сборки и криостата 35-полюсного 4.2 Тл вигглера на накопителе LNLS (Бразилия).

Особенностью вигглеров с коротким периодом и невысоким уровнем поля является то, что форма спектра излучения из таких магнитных структур приближается на низких энергиях квантов к спектру ондулятора, в котором начинает наблюдаться интерференционная картина. Другой важной особенностью магнитов с такими параметрами является необходимость повышенного качества и точности изготовления обмоток, так как на фоне небольших механических размеров стандартные точности изготовления уже вносят большую относительную ошибку и портят качество магнитного поля. Особенно остро эта проблема стоит при изготовлении, собственно, сверхпроводящих ондуляторов, где механические отклонения на уровне всего десятков микрон в величине магнитного зазора и периода не позволят получить интерференционную картину в спектре излучения. В Таблице 3.9 представлены три вигглера, имеющих такие параметры, созданные ИЯФ СО РАН для международных центров синхротронного излучения.

Таблица 3.9. Основные параметры многополюсных вигглеров с коротким периодом и низким уровнем поля.

Источник СИ,	CLS,	ALBA,	ANKA-
Энергия,	2.9 ГэВ,	3 ГэВ,	CATACT
расположение,	Канада,	Испания,	2.5 ГэВ,
год,	2005,	2010,	Германия,
публикации	[128, 129, 130,	[139,140,	2013
	131, 134]	141, 142]	
Магнитное поле,	2 (2.2)	2.1 (2.27)	2.5 (2.85)
В _{раб} (В _{макс}), Тл			
Число полюсов	61+2	117+2	36+4
(осн.+бок.)			
Период, мм	34	30	47
Зазор магнитный	13.5 (9.5)	12.6 (8.5)	19 (15)
(для пучка), мм			
Гор. апертура, мм	50	60	60
Магнитная	1120	1892	1082
длина, мм			
Крит. энергия, КэВ	12.4 (1.01)	13.1 (0.94)	15.5 (0.79)
(длина волны, Å)			
Параметр К	6.5	6	12
Мощность,	12	20	4.5
(ток пучка, А), кВт	(0.5 A)	(0.4)	(0.2)
Токи в обмотках, А	оки в обмотках, А 800		540+460
Крит. ток провода с	ок провода с 520 А		520 A
в поле 7 Тл	юле 7 Тл (диам.0.9 мм)		(диам.0.9 мм)
Запасённая	15	19	30
энергия, кДж			
Расход гелия, л/ч	0	0	0

3.3.1 63-полюсный 2 Тл вигглер для накопителя CLS

Потребность в вигглере с полем 2 Тл и максимально возможным числом полюсов возникла на канадском источнике излучения CLS (Canadian Light Source) с энергией 2.9 ГэВ для проведения Micro-XAFS экспериментов, для чего было необходимо иметь максимальный поток фотонов в энергетическом диапазоне от 3 КэВ до 40 КэВ с критической энергией спектра > 10 КэВ. В результате оптимизации величины периода и минимизации до разумных пределов магнитного зазора было получено, что величина периода должна быть ~ 34 мм и при этом в доступный промежуток накопителя можно было вписать 63 полюса. Интересной особенностью этого вигглера является то, исходя из соотношения величины поля $B_0 = 2$ Тл и периода $\lambda_0 = 3.4$ см, коэффициент ондуляторности (см. формулу(1.11)) имел значение $K = 0.934 \cdot 2[T_{\pi}] \cdot 3.4[c_{M}] = 6.35$, что автоматически приближало его спектр к спектру ондулятора на низких энергиях фотонов. Однако для проведения экспериментов на этом вигглере был необходим, наоборот, непрерывный спектр излучения, характерный для обычного вигглера. Поэтому для получения более гладкого спектра в необходимой спектральной области регулярность расположения катушек вигглера была преднамеренно нарушена, чтобы разрушить неизбежную при таких параметрах интерференционную картину в излучении. Для этой цели был подобран набор прокладок из стеклотекстолита, имевший толщины, кратные 0.2 мм, которые были расставлены в псевдо – случайном порядке между всеми катушками магнитной структуры. Результат такого искусственного нарушения упорядоченности представлен на Рисунке 113, из которого видно, что амплитуда спектральных пиков уменьшилась в несколько раз по сравнению с ненарушенной структурой. Таким способом была улучшена гладкость спектра в районе энергий фотонов от 1 до 4 КэВ, что позволило проводить необходимые исследования и в этой области спектра [128, 130, 131, 133, 134, 138].



Рисунок 113. Спектральный поток фотонов из 2 Тл 63-полюсного вигглера с периодом 34 мм и коэффициентом ондуляторности К ~ 6 с нарушенной периодичностью на накопителе CLS.

На Рисунке 114 представлен внешний вид двух половинок этого вигглера перед финальной сборкой, а на Рисунке 115 - вид вигглера установленного на кольце накопителя CLS.



Рисунок 114. Магнитная система 2 Тл 63полюсного вигглера для CLS



Рисунок 115. Вид 2 Тл 63-полюсного вигглера, установленного на накопителе CLS

3.3.2 119-полюсный 2.1 Тл вигглер для накопителя ALBA-CELLS

Созданный в 2010 году для накопителя ALBA-CELLS (Испания) 119поглюсный вигглер с магнитным полем 2.1 Тл по своим параметрам вплотную приблизился к параметрам сверхпроводящих ондуляторов. Поэтому при его проектировании пришлось учитывать некоторые специфические особенности, связанные как с выбором геометрии самой магнитной системы, так и с изготовлением сверхпроводящих обмоток с предельно малыми размерами.

Традиционным подходом большинства исследовательских групп во всем мире, которые занимаются созданием сверхпроводящих ондуляторов и близких к ним по размерам магнитных структур, является безальтернативное использование магнитной структуры типа вертикальный рейстрек, которая схематично изображена на Рисунке 116, а для сравнения на Рисунке 117 показан горизонтальный рейстрек.



Рисунок 116. Магнитная структура типа вертикальный рейстрек.



Рисунок 117. Магнитная структура типа горизонтальный рейстрек.

В случае вертикального рейстрека каждая из половинок магнита представляет собой цилиндр с вырезанными концентрическими канавками для укладки провода. Такую структуру используют для создания сверхпроводящих ондуляторов, в частности группы из APS (Advanced Photon Source, США) [58], KIT (Karlsruhe Institute of Technology, Германия) [59], а также DLS (Diamond Light Source, Англия) [60]. Однако, при создании данного вигглера, который можно было бы спроектировать с использованием традиционного для устройств данных вертикального рейстрека, было высказано предположение, что и здесь будет горизонтального рейстрека, выгоднее использовать концепцию которая всех остальных вигглеров, создаваемых в ИЯФ СО РАН. использовалась ДЛЯ

Обоснование такого вывода можно найти в Таблице 3.10, где приведены сравнительные характеристики обоих типов магнитных структур.

Таблица	3.10.	Сравнительные	характеристики	магнитных	структур	типа
горизонта	льный и	и вертикальный р	ейстрек			

Горизонтальный рейстрек		Вертикальный рейстрек	
Короткие куски сверхпроводящего	+	Общая непрерывная длина	-
провода		провода в 3-4 раза больше	
Минимальная накопленная	+	Накопленная энергия и	-
энергия и индуктивность		индуктивность больше в 3 раза	
Возможность использовать две	+	Только односекционная обмотка	-
секции, добавляющих 15% поля			
Возможность быстрой замены	+	Необходимость замены всего	-
сгоревшей катушки		блока катушек	
Возможность дополнительного	+	Бандажирование обмоток только	-
бандажирования обмоток		за счёт КТР	
Большое число спаев между	-	Малое количество спаев	+
катушками			
Маленький радиус загиба провода	-	Большой радиус загиба провода	+

Из данной таблицы можно сделать заключение, что, несмотря на два недостатка, имеющихся у горизонтального рейстрека, в виде большого числа спаев и малого радиуса загиба провода, горизонтальная конструкция выигрывает по сравнению с вертикальной. Несмотря на то, что число спаев, соединяющих последовательно соединяемые обмотки в данном вигглере, должно быть ~250, имеющаяся в ИЯФ СО РАН технология холодной сварки Nb-Ti проводов позволяет получать стабильные сопротивления на уровне ~10⁻¹² – 10⁻¹³ Ом, что даже при токе ~1000 А даёт теплоприток в гелий, не превышающий ~ 1 мВт. На Рисунке 118 показаны образцы соединения Nb-Ti проводов диаметром 0.92 мм комбинированным методом холодной сварки с последующим проваром аргонодуговой сваркой, а на

Рисунке 119 показаны привода, подготовленные к сварке контактов на одном из многополюсных вигглеров.



Рисунок 118. Образцы соединения Nb-Ti проводов методом холодной сварки с последующим проваром аргонодуговой сваркой

Рисунок 119. Провода многополюсного вигглера, подготовленные к сварке контактов.

Для решения проблемы с возможной деформацией провода и потери его токонесущей способности при намотке на малый радиус было предложено изготавливать обмотки из более тонкого провода с диаметром 0.55 мм, позволяющего делать радиус изгиба до требуемых ~ 4 мм и который имеет критический ток до 230 А в поле 7 Тл.

Таким образом, технические проблемы, которой могли бы помешать использованию горизонтального рейстрека, были решены. Отметим, что данный подход имеет очень важное преимущество в возможности быстрой и дешёвой замены отдельной неисправной катушки, что может значительно удешевить массовое производство сверхпроводящих вигглеров, например, при создании затухательных колец. Так, например, существует проект Compact Linear Collider (CLIC), который предполагает установку 104 отдельных сверхпроводящих вигглеров в виде электронного и позитронного затухательных колец .для уменьшения эмиттанса пучков.

В процессе проектирования вигглера ALBA, помимо требований по спектральной плотности потока фотонов, возникло дополнительное ограничение на величину генерируемой мощности излучения, так как существующие на накопителе



приёмники излучения были рассчитаны на максимальную мощность ~20 кВт. Поэтому оптимизация величины периода для получения максимального потока фотонов при энергии пучка 3 ГэВ и токе 400 мА в диапазоне энергий от 10 до 40 КэВ при доступной магнитной длине вигглера 1.9 м производилась с учётом ограничения по мощности. На Рисунке 120 представлена зависимость величины поля на орбите от длины периода, при фиксированной апертуре для пучка, равной 8.5 мм. В результате оптимизации величина периода, при которой одновременно выполнялись бы ограничения по длине магнита и допустимой мощности, составила ~ 31 мм при поле на орбите 2.1 Тл. На Рисунке 121 показана зависимость излучаемой мощности от длины периода вигглера.



Рисунок 120. Зависимость магнитного Рисунок 121. Зависимость мощности поля на орбите от длины периода. излучения от длины периода.

Оптимальное значение периода вигтлера имеет разное значение для различных энергии излучаемых фотонов. Так, из Рисунка 122, на котором представлен спектральный поток фотонов для различных энергий, можно заметить, что для энергий 10 КэВ оптимален период 26 мм, а для максимума на энергии 40 КэВ необходим период 32 мм, однако, как видно из Рисунка 123, для максимального интегрального потока фотонов при ограничениях, накладываемых доступными длиной и мощностью, оптимален именно период 31 мм.





Рисунок 122. Зависимость потока фотонов для различных энергий от величины периода.

Рисунок 123. Зависимость интегрального потока фотонов от длины периода.

В процессе тренировки на оси вигтлера было достигнуто максимальное поле 2.17 Тл, что, как можно заметить из Рисунка 124, соответствует величине тока в обмотке, отстоящего от критического значения на ~ 5%, что является очень хорошим результатом для обмотки типа рейстрек. Для повышения устойчивости обмотки в компаунде был использован наполнитель с высокой теплоёмкостью Gd_2O_3S . Интересно отметить, что, благодаря невысокой запасённой энергии, равной ~ 19 кДж и пониженному давлению в криостате, жидкий гелий во время проведённых в течение 1 часа трёх переходов в нормальное состояние не выходил в атмосферу. Давление в криостате, как можно увидеть из Рисунка 125, повышалось на ~0.2 бар во время каждой потери сверхпроводимости и вновь начинало опускаться.

На Рисунке 126 показан процесс сборки магнитной структуры 119-полюсного 2.1 Тл вигглера для накопителя ALBA, а на Рисунке 127 представлен внешний вид этого вигглера, перед установкой на накопитель.





Рисунок 124. Рабочая точка, соответствующая достигнутому в вигглере ALBA полю на обмотке 2.17 Тл относительно нагрузочной кривой Nb-Ti провода с диаметром 0.55 мм.



Рисунок 125. Поведение давления в гелиевом сосуде в процессе потери сверхпроводимости на вигглере ALBA



Рисунок 126. Процесс сборки магнитной структуры 119-полюсного 2.1 Тл вигглера для накопителя ALBA



Рисунок 127. Внешний вид 119полюсного 2.1 Тл вигглера для накопителя ALBA

160

Выводы к Главе 3:

1. Разработаны и созданы реальные периодические магнитные структуры сверхпроводящих вигглеров с набором параметров, позволивших перекрыть весь востребованный спектральный диапазон для экспериментов с синхротронным излучением;

2. Сформулированы, обоснованы и реализованы на реальных магнитах основные принципы построения многополюсных сверхпроводящих вигглеров:

- Оптимизации основных параметров вигглера (зазор, магнитное поле и период) для получения максимального спектрального потока генерируемого синхротронного излучения;
- Разбиение обмоток центрального полюса на две секции, запитываемых оптимальным током, с целью увеличения уровня поля на ~13-15%;
- Использование секционирования обмоток для раздельной запитки независимыми токами с целью зануления интегралов поля;
- Бандажирование обмоток с помощью продольных бронзовых шпилек, что особенно важно для магнитов с высоким уровнем поля;
- Концепция защиты обмоток вигглера при потере сверхпроводимости, при которой все обмотки разбиваются на группы, шунтируемые цепочкой из диодов и резисторов, в которых поглощается безопасное количество энергии;

3. Разработаны и неоднократно продемонстрированы на реальных устройствах преимущества технология «мокрой» намотки для изготовления сверхпроводящих обмоток, позволяющая стабильно достигать до 95 % от тока короткого образца на катушках типа рейстрек;

4. Предложен и разработан способ подгонки токов в обмотках многополюсных вигглеров с помощью натянутой статической проволочки с током, позволяющий более оперативно занулять интегралы магнитного поля с требуемой точностью;

5. Обоснованы и доказаны на практике преимущества использования схемы горизонтального (в отличие от вертикального) рейстрека для создания

сверхпроводящих ондуляторов и близких к ним по размерам периодических магнитных структур;

6. Предложен и реализован метод повышения устойчивости обмоток к выходу из сверхпроводящего состояния, спровоцированного локальными сбросами электронного пучка накопителя при инжекции, состоящий в использовании в сверхпроводящих обмотках многополюсных вигглеров теплоёмких добавок в эпоксидный компаунд на основе гадолиния.

Глава 4

Криогенная система многополюсных сверхпроводящих вигглеров с нулевым расходом жидкого гелия

Криогенные системы сверхпроводящих вставных устройств, которые предназначены для работы на ускорителях заряженных частиц, а особенно на специализированных накопителях – источниках синхротронного излучения, кроме такой очевидной задачи, как обеспечение криогенных температур, имеют и специфические требования, которые необходимо учитывать при их проектировании: 1. Криостаты вставных устройств должны не просто иметь вакуумную камеру,

предназначенную для пролёта электронного пучка, а эта камера должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к сверхвысоковакуумному оборудованию. Это относится не только к способам очистки камеры при изготовлении и подготовке к работе, но и накладывает ограничения как на разрешённые к использованию в сверхвысоком вакууме материалы, так и на чисто конструктивные особенности. Например, в конструкции сверхвысоковакуумных камер следует избегать узких щелей и полостей, что значительно ограничивает возможность применения наружных сварочных швов и может существенно усложнять технологический процесс изготовления криостата.

2. Конструкционные материалы, используемые в криостате, кроме очевидных требований к использованию в криогенных температурах, должны выдерживать также и долговременную радиационную нагрузку. Более того, это требование существенно не только для тех частей криостата, которые находятся в непосредственной близости от электронного пучка, но так же и для узлов, отвечающих за выставку и подвеску внутренних элементов криостата, от стабильного и точного положения которых зависит не только распределение магнитного поля, но и исправность всего устройства в целом. К тому же, радиационному воздействию могут подвергаться даже сами сверхпроводящие катушки, пропитанные эпоксидным компаундом, которые, хотя и отделены от

пучка вакуумной камерой, но в процессе инжекции, а особенно при аварийном сбросе пучка, в них может поглощаться значительная доля энергии электронного Эти сбросы провоцировать пучка. энергии могут не только потерю сверхпроводимости, но даже выводить из строя сами сверхпроводящие обмотки. Например, возможен механизм, при котором под воздействием радиации в материалах, изолирующих обмотки, могут появляться носители заряда, и по образующимся проводящим мостикам возможен электрический пробой. Высокое напряжение, приводящее к пробою, может появиться на обмотке, по которой протекает ток, при внезапном нагреве сверхпроводника и появлении в нем зоны нормальной проводимости, возникающей под действием радиации при сбросе того же электронного пучка. В частности, в работе [62] проводилось исследование влияния аварийных сбросов электронного пучка накопителя CLS (Канада), энергию пучка 2.9 ГэВ, на потерю имеющего сверхпроводимости на установленных там двух многополюсных сверхпроводящий вигглерах, созданных в ИЯФ СО РАН. На Рисунке 128 представлены результаты моделирования распределения энергии, поглощённой внутри сверхпроводящего вигглера, откуда становится очевидно, что при каждом сбросе пучка обмотки вигглера подвергаются сильному воздействию радиации.



Рисунок 128. Результат моделирования попадания электронов на защитный абсорбер, находящийся перед вигглером, и последующей бомбардировки сверхпроводящего вигглера образованными при этом частицами [62].

3. Условия эксплуатации таких устройств предполагают также наличие дополнительной тепловой нагрузки на криогенную систему, связанной с нагревом вакуумной камеры, как со стороны электронного пучка, так и от синхротронного излучения. При этом характерная величина тепловой мощности, определяемая различными механизмами взаимодействия пучка с вакуумной камерой, может достигать нескольких десятков ватт.

4. что должна обеспечиваться соответствующая криогенная Кроме того, температура на сверхпроводящих обмотках, такие криостаты должны работать времени. Дело в том, что, как правило, автономно в течение длительного накопители – источники синхротронного излучения, предназначены для работы в непрерывном режиме и остановки для профилактических работ планируются на них заранее за несколько месяцев вперёд. Более того, эффективность работы такого источника, с точки зрения экономических затрат, напрямую зависит от времени его непрерывной работы. Так, даже время, составляющее 10-15 минут, необходимое для инжекции и последующего подъёма энергии электронного пучка (который затухает со временем, так как имеет конечное время жизни), значительно сокращает эффективность работы источника СИ. Поэтому в настоящее время все большее число накопителей подвергаются глубокой и дорогой модернизации для перевода в режим инжекции на полной энергии в непрерывном режиме.

Очевидно, что при таких жёстких требованиях величина расхода жидкого гелия и азота в криостатах, работающих непосредственно на накопителе, существенно влияет не только на удобство, но и на саму возможность ИХ Заливка испарённых хладагентов требует, как минимум, длинных эксплуатации. трасс для транспортировки гелия и азота в криостат, а как максимум, непосредственного доступа к криостату, находящемуся внутри биологический накопителя. Трассы для заливки гелия представляют собой сложные защиты технические изделия, включающие в себя вакуумированный объем с тепловыми экранами. Длина такой трассы ограничивается не только стоимостью, но и высокими тепловыми потерями на испарение, которые могут достигать величины до 0.5 Вт/м. В Таблице 1.3 были приведены основные параметры нескольких сверхпроводящих вигглеров, созданных различными группами в мире к началу 2000-х годов для работы на различных накопителях – источниках СИ. Как можно заметить, типичный расход гелия в таких вигглерах был примерно одинаковым и составлял в лучшем случае около ~2 л/час. При такой скорости испарения, даже увеличивая объем с жидким гелием до 300-400 литров, не удавалось продлить срок непрерывной работы криостатов без заливки гелия более, чем на 1 неделю. Такой расход становился уже абсолютно неприемлемым с точки зрения эффективной работы накопителей, так как заправка гелием требовала сброса электронного пучка, остановки работы основных систем накопителя и открытия биозащиты. Повторное же включение накопителя и особенно вывод его на рабочий режим требовал значительного времени, в том числе из-за длительного прогрева элементов инжектора и магнитной системы.

Как следует из вышесказанного, задача уменьшения расхода жидкого гелия до приемлемых значений, позволяющих непрерывную эксплуатацию сверхпроводящих вигглеров по крайней мере в течение нескольких месяцев, становится более чем актуальной. Далее рассмотрим основные этапы совершенствования криогенных систем сверхпроводящих вигглеров, направленные на сокращение расхода жидкого гелия.

4.1. Вигглер для PLS

Конструкция первого криостата для сверхпроводящего трёхполюсного шифтера с полем 7.5 Тл, разработанного в ИЯФ СО РАН и установленного в 1995 году на накопителе Pohang Light Source (PLS) в Южной Корее [93, 94], имела концепцию, которая повсеместно использовалась в большинстве сверхпроводящих магнитов и соответствовала традиционным подходам к проектированию криогенных систем, характерным для того времени. Конструкция и внешний вид этого вигглера изображены на Рисунке 129 и Рисунке 130, соответственно.



Рисунок 129. Конструкция криостата 7.5 Тл сверхпроводящего шифтера для накопителя PLS. Экран охлаждается жидким азотом. Расход жидкого гелия ~3 л/час.



Рисунок 130 7.5 Тл сверхпроводящий шифтер для накопителя PLS (1995 год).

167

наружного корпуса с защитным вакуумом размещался сосуд со Внутри сверхпроводящим магнитом, в который заливался жидкий гелий. Для увеличения периода между заливками объем жидкого гелия в криостате был искусственно увеличен за счёт дополнительного накопительного криостата, размещённого непосредственно над основным криостатом. Гелиевый сосуд был окружён медным тепловым экраном, охлаждаемым посредством механического контакта co специальным бачком, наполняемым жидким азотом. Подвеска гелиевого и азотного осуществлялась с помощью стержней сосудов ИЗ инвара, имеющего теплопроводность, сравнимую с нержавеющей сталью И очень низким коэффициентом теплового расширения. Последнее было важно для стабилизации положения магнита в процессе охлаждения до криогенных температур.

Ввод тока в магнит обеспечивался через горловину, соединяющую гелиевый сосуд с наружным сервисным фланцем. При этом в качестве токовводов медные трубки с развитым внутри сечением для использовались продувные лучшего теплообмена, которые охлаждались обратным потоком выходящего через них наружу испарённого гелия. Геометрия токовводов была оптимизирована по на пропускание требуемого тока величиной ~ 150 А. длине и сечению Оптимизация предполагала минимизацию притока тепла в жидкий гелий, определяемого одновременно двумя процессами – теплопроводностью по меди снаружи криостата и джоулевым нагревом при протекании электрического тока внутри токоввода. При этом при увеличении тока возрастало испарение гелия и, следовательно, усиливалось охлаждение токоввода.

4.1.1. Теплоприток через оптимизированные медные токовводы

Так как теплоприток в криостат происходит главным образом через токовводы, то при проектировании токовводов задача состоит в сведении к минимуму теплопритока в криостат при заданном токе в магните. Пусть один конец медного токоввода с током I находится при комнатной температуре θ_2 , а второй

имеет температуру жидкого гелия θ_1 . Тогда уравнение теплового равновесия для участка токоввода dx будет иметь вид [50]:

$$\frac{d}{dx}\left[k(\theta)A\frac{d\theta}{dx}\right] + \frac{I^2\rho(\theta)}{A} - f\dot{m}C_p\frac{d\theta}{dx} = 0,$$
(4.1)

где

 $k(\theta)$ - теплопроводность меди,

 $\dot{m}(\kappa r/c)$ - скорость испарения жидкого гелия за счет притока тепла,

*C*_p - удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,

 $\rho(\theta)$ - удельное сопротивление меди,

А - площадь поперечного сечения токоввода,

f - коэффициент эффективности теплообмена при охлаждении токоввода газообразным гелием (при f = 1 весь испарившийся гелий расходуется на охлаждение токоввода; при этом считаем, что в каждой точке с координатой xтоковвод и газ имеют одинаковую температуру).

Первый член в уравнении (4.1) определяет теплоприток в криостат, обусловленный теплопроводностью токоввода, а второй – омический нагрев протекающим током. Эти два процесса компенсируются третьим членом, который отвечает за теплоотвод потоком газа. Следовательно, сечение токоввода, с одной стороны, должно быть малым с точки зрения уменьшения теплопритока за счёт теплопроводности в жидкий гелий, а с другой стороны – достаточно большим для предотвращения омического нагрева токоввода при протекании через него тока. Воспользуемся некоторыми практическими соотношениями, следующими из уравнения (4.1), подробное решение которого приводится в работе [50]:

1. Оптимальный теплоприток на единицу силы тока оказывается равным:

$$w/I = 1.04 \cdot 10^{-3} \,\mathrm{Br/A} \tag{4.2}$$

Следовательно, в случае оптимизации токовводов на ток 150 A, теплоприток в криостат от каждого токоввода составит 0.156 Bt, а общий приток тепла от четырёх токовводов составит 0.624 Bt, что соответствует расходу гелия 0.87 л/ч, и это будет минимально возможный приток тепла;

2. Если же теплообмен отсутствует (f = 0), то последний член в уравнении (4.1) исчезает. В этом случае теплоприток на единицу силы тока значительно вырастет и составит:

$$w/I = 47 \cdot 10^{-3} \,\mathrm{Br/A} \tag{4.3}$$

Следовательно, в отсутствии теплообмена теплоприток будет равен уже 28 Вт.

3. Частный случай решения уравнения (4.1) для теплопритока в отсутствие тока (второй член уравнения равен нулю) описывается как:

$w/I = 0.7 \cdot 10^{-3} \mathrm{Bt/A}$	Для чистой технической меди	(4.4)
$w/I = 0.4 \cdot 10^{-3} \mathrm{Bt/A}$	Для чистой отожжённой меди	(4.5)

В нашем случае приток тепла без тока для четырёх токовводов составит 0.24 Вт.

4. Длину *L* оптимизированного токоввода для сечения *A* можно выразить через форм-фактор:

$$\frac{I \cdot L}{A} = 2.6 \cdot 10^7 \text{A/M}$$
 Для чистой отожжённой меди (4.6)

$$\frac{I \cdot L}{A} = 3.5 \cdot 10^{6} \text{A/m}$$
 Для чистой технической меди (4.7)

При этом форм-фактор постоянен для любых оптимальных токовводов из данного материала независимо от силы тока. Использование чистой отожжённой меди может несколько снизить оптимальную мощность теплопритока, однако приводит к нестабильности токовводов и их перегреванию при токах, не намного превосходящих оптимальный [63]. Поэтому предпочтительно выбирать техническую медь и, исходя из этого при общей длине токоввода 500 мм, которая определялась конструктивными соображениями, было выбрано сечение меди 21 мм²

Известно, что при теплопритоке в 1 Дж испаряется 48 мг жидкого гелия, а для нагрева такой массы газа до комнатной температуры потребуется уже энергия 74 Дж. Поэтому основное требование к конструкции оптимизированного токоввода сводится к тому, чтобы теплоприток расходовался не только на испарение жидкого

гелия, но и на нагрев этого газа до комнатной температуры. Следовательно, токоввод должен проектироваться в виде хорошего теплообменника. На Рисунке 131 и Рисунке 132 представлена конструкция токоввода, оптимизированная на ток 150 А и внешний вид готового токоввода, соответственно. Токоввод состоит из двух коаксиальных медных трубок, которые образуют лабиринт для прохода газообразного гелия.



Рисунок 131. Конструкция оптимизированного медного токоввода.



Рисунок 132. Внешний вид оптимизированных медных токовводов.

Таким образом, расход гелия от токовводов составил 0.87 л/ч, а общий расход жидкого гелия в этом криостате составлял ~ 2.5 л/ч, что соответствовало общему притоку тепла 1.8 Вт. Расход жидкого азота, испаряемого при охлаждении экранов, был равен 2 л/час.

Для начала 2000-х годов такое потребление жидкого гелия хотя и считалось нормой, однако сильно затрудняло эксплуатацию вигглера на накопителе, так как

требовало заливки гелия каждые 3 дня. Поэтому назревшая к тому времени проблема разработки и создания реально работающего вставного устройства, имеющего криогенную систему, которая обеспечивала бы минимально возможное потребление жидкого гелия и могла надёжно эксплуатироваться на накопителях заряженных частиц, становилась более чем актуальной. Для решения этой проблемы, ставшей одной из ключевых задач данной работы, было предпринято множество последовательных шагов по выявлению и исследованию всех возможных каналов притока тепла в криостат и поиску способов их устранения. сама концепция криогенной системы не просто подвергалась При этом непрерывным изменениям, но и проходила каждый раз проверку на реальных устройствах, создаваемых для работы в реальных условиях накопителей в качестве генераторов синхротронного излучения. В результате этих исследований была создана целая серия сверхпроводящих вигглеров, каждый из которых отличался от предыдущего, в том числе и более совершенной криогенной системой. В результате этих исследований удалось не только добиться снижения расхода жидкого гелия до реального нулевого уровня, но и качественно повысить производительность криогенной системы вплоть до понижения давления в гелиевом сосуде ниже атмосферного и создания условий для реальной реконденсации жидкого гелия в криостате. Основные этапы этих исследований представлены ниже на примерах конкретных сверхпроводящих вигглеров, разработанных и изготовленных в ИЯФ СО РАН для различных центров синхротронного излучения.

4.2. Вигглер для LSU-CAMD

В конструкцию криостата для следующего вигглера, установленном в 1998 году на накопителе LSU-CAMD (Луизиана, США) [97], внешний вид которого представлен на Рисунке 133 были внесены существенные изменения для уменьшения потребления жидкого гелия.



Рисунок 133. Трёхполюсный шифтер с полем 7.5 Тл на накопителе LSU-CAMD.

4.2.1. Использование кевлара для подвески гелиевого сосуда

В качестве материала для подвески гелиевого сосуда внутри криостата вместо инвара, обладающего низким коэффициентом теплового расширения И теплопроводностью, сравнимой с нержавеющей сталью, было предложено использовать ленты из кевларовой нити, имеющей низкую теплопроводность и экстремально высокую механическую прочность на разрыв. Так, прочность на разрыв у кевлара значительно выше, чем у металлов и составляет 2760 МПа. Для сравнения, аналогичная характеристика у стали равна всего 700 МПа. Это позволило резко уменьшить сечение ленты и, следовательно, радикально снизить теплопритоки в жидкий гелий. В частности, при общей массе гелиевого бака вместе с магнитом 1200 кг каждая из четырёх основных ленточных подвесок имеет сечение ~6 мм². На Рисунке 134 изображены четыре основных кевларовых подвески и на Рисунке 135 пример использования кевларовых тяг для подвески гелиевого сосуда в криостате.



Рисунок 134. Кевларовые ленты для подвески гелиевого сосуда.



Рисунок 135. Пример использования кевларовых тяг для подвески гелиевого сосуда в криостате.

Теплопроводность кевлара сильно зависит от конкретной марки и в некоторых справочниках производителя имеет чрезвычайно низкое значение при комнатной температуре, равное всего $\lambda = 0.04$ Вт/м/К. Однако в других источниках гораздо большее значение λ≈0.5 BT/M/K. Для приводится сравнения, теплопроводность инвара – металла с довольно низкой теплопроводностью – составляет уже 13 Ватт/м/К. Взяв в качестве оценки сверху худшее значение и, считая его неизменным для всего диапазона температур, что является опять же оценкой сверху, так как с понижением температуры его теплопроводность только уменьшается, получим, что общий теплоприток по всем четырём кевларовым подвескам не превышает:

$$Q = \frac{\lambda \cdot S \cdot \Delta T}{L} = 0.01$$
Вт, (4.8)
где $S = 50 \cdot 10^{-6}$ м

 $\Delta T = 300$ К –разность температур на концах подвесок

L = 0.5 м – длина подвески

Величина 10 мВт, пренебрежимо мала по сравнению с остальными источниками тепла. Для сравнения приток тепла по инваровым подвескам составлял ~ 0.3 Вт, Следовательно, использование кевлара позволило практически полностью исключить приток тепла по подвескам из общего баланса теплопритоков в жидкий гелий.

174

Следует отметить, что применение именно инвара в конструкции предыдущего вигглера объяснялось требованием минимизации механических смещений магнита внутри криостата в процессе охлаждения. Точная и контролируемая подстройка положения магнита относительно геодезических реперов, размещённых на наружном корпусе криостата, может быть доступна только в процессе сборки криостата и очень затруднена на уже собранном вигглере после охлаждения его до криогенных температур. При этом к точности выставки положения магнита необходимо относиться с особенной тщательностью именно в случае со сверхпроводящими вставными устройствами, работающими на накопителях, так как неконтролируемое смещение магнита внутри криостата может существенно повлиять на динамику электронного пучка. Стандартное требование к магнитной структуры накопителя составляет точности положения элементов обычно ~ 0.1 мм. Отметим, что геометрическое место подвески гелиевого бака по высоте было выбрано таким образом, чтобы при его охлаждении происходила бы нержавеющего гелиевого взаимная компенсация изменения размеров бака (укорачивание) И кевларовой подвески (удлинение). Таким образом, результирующее вертикальное положение гелиевой вакуумной камеры и магнита остаётся неизменным.

4.2.2 Криогенная суперизоляция для подавления излучения

Кроме того, для подавления притока тепла снаружи через излучение было значительно увеличено количество слоёв криогенной суперизоляции, которая представляет собой многослойный пакет из алюминизированой лавсановой плёнки с дистанцирующими прокладками из стекловолокна или нейлона. На Рисунке 136 изображён гелиевый бак в процессе сборки криостата, покрытый криогенной суперизоляцией.



Рисунок 136. Гелиевый сосуд криостата, покрытый криогенной суперизоляцией.

Теплоприток на гелиевый бак через излучение можно оценить как:

$$Q = \sigma \varepsilon_{eff} S(T_N^4 - T_{He}^4), \tag{4.9}$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [BT/M^2 \cdot K^4]$ - постоянная Стефана-Больцмана,

S - площадь поверхности гелиевого бака, составляющая ${\sim}7\text{m}^2,$

T_N - температура жидкого азота,

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{Cu} + \frac{1}{\varepsilon_{SS}} + \frac{N_{layer}}{\varepsilon_{Al}} - 1}}$$
 - эффективная степень черноты

Подставляя значения для полированной меди $\varepsilon_{Cu} = 0.02$, нержавеющей стали $\varepsilon_{ss} = 0.05$ и алюминия $\varepsilon_{Al} = 0.05$ получим, что приток тепла на гелиевый сосуд составляет ~0.24 Вт без суперизоляции и 0.06 Ватт при использовании 10 слоёв суперизоляции. Таким образом, использование 10 слоёв суперизоляции уменьшает теплоприток в ~4 раза. Теплозащитный медный экран толщиной 3 мм, соединённый с ёмкостью для жидкого азота, подвешен к стенкам наружного корпуса так же с использованием кевларовых тяг длиной 200 мм. Поверхность его покрыта 30 слоями

суперизоляции, что эквивалентно уменьшению мощности излучения на азотный экран в ~10 раз.

Таким образом, благодаря использованию суперизоляции и кевларовых подвесок общий теплоприток в жидкий гелий в этом криостате уменьшился уже до ~1.1 Ватт, что соответствует расходу жидкого гелия ~1.5 л/ч.

4.3. Использование криокулеров для охлаждения тепловых экранов

В качестве следующего шага по модернизации криогенной системы вигтлеров было предложено отказаться от применения жидкого азота для охлаждения теплового экрана и использовать для этой цели промышленно выпускаемые криокулеры (от анг. "cryocooler").

Кроме очевидного выигрыша в удобстве эксплуатации, ввиду отсутствия жидкого азота, применение криокулеров, имеющих две холодильные ступени с температурами 60К и 20К, позволило поместить в криостат уже два тепловых экрана с соответствующими температурами и, тем самым, существенно снизить приток тепла через излучение на внутренний сосуд с жидким гелием. Подставляя соответствующие значения в формулу (4.9), получим, что мощность излучения, попадающая на гелиевый сосуд, покрытый 10 слоями суперизоляции и окружённый тепловым экраном с температурой 20 К будет равна 0.00023 Вт. Это значение, которое в ~250 раз меньше, чем при одном тепловом экране с температурой 80 К, позволяет вообще исключить из рассмотрения теплоприток в гелий через излучение.

Можно также отметить, что приток тепла через излучение на внутренний 20 К экран с наружного 60 К экрана составляет всего ~0.05 Вт, а приток снаружи на 60 К экран с 30 слоями суперизоляции будет равен 8 Вт. При этом мощность соответствующих ступеней криокулера составляет обычно ~40 Вт на первой 60 К ступени и ~10 Вт на второй 20К ступени, что даёт хороший запас устойчивости такой криогенной системе.

Таким образом, переход на использование криокулеров вместо жидкого азота позволяет снизить долю тепла, попадающего в жидкий гелий через излучение до пренебрежимо малой величины и также позволяют не обращать внимание на приток

теплового излучения на экраны при рассмотрении общего теплового баланса криостата.

4.3.1. Состояние рынка криокулеров в мире

В настоящее время рынок криокулеров, охлаждающих до криогенных температур, сформирован в основном устройствами, работающими на основе двухступенчатого цикла Эриксона, являющегося модифицированным циклом Карно. Исторически эти устройства носят название криокулеры Гиффорда-МакМагона (Gifford-McMahon) B соответствии с именами инженеров, предложивших техническое решение по реализации этого цикла на конкретных коммерческих криокулерах. Составной частью таких охладительных машин является регенератор, то есть устройство аккумулирующее и отдающие тепло в течение каждого цикла. От эффективности работы регенератора зависит КПД устройства, которое реально составляет порядка 20% от эффективности цикла Карно. Регенератор делается из пористого материала с большой теплоёмкостью. Производительность традиционных устройств такого типа, использующих свинцовую дробь в регенераторе, ограничены температурой 12 К при нулевой тепловой нагрузке, так как этот регенерирующий материал ограничен по холодопроизводительности вследствие быстрого падения теплоёмкости с уменьшением температуры. Однако на базе ряда редкоземельных материалов, которые сохраняют заметную теплоёмкость при 4 К, различными производителями в Японии (Sumitomo Heavy Industries), США (APD Cryogenics), Германии (Leybold Cryogenics) были разработаны двухступенчатые криокулеры, использующие принцип Гиффорда - МакМагона, на которых минимально достижимая температура в ненагруженном состоянии составляет примерно 3К, так что при 4.2К удаётся отводить тепловую мощность на уровне 0.1 – 1.5 Вт. Данные устройства, использующие в качестве рабочего тела гелий, состоят из компрессора, создающего разность давлений ~0.5 - 2.3 МПа и газовых подводов высокого и низкого давлений для соединения компрессора с холодильной головкой. В холодильной головке имеется поршень с регенератором, который приводится в движение либо механически, либо пневматическим образом. Движение поршня должно быть жёстко синхронизировано с включением и выключением линий высокого и низкого давлений. Как правило, эти устройства работают с частотой несколько герц. В Таблице 4.1 приведены характеристики основных коммерчески доступных криокулеров различных производителей. Нагрузочные кривые этих устройств представлены на Рисунке 137.

Таблица 4.1. Основные характеристики криокулеров различных производителей.

	LEYBOLD	LEYBOLD	Sumitomo HI	Sumitomo HI
Производитель	(Германия)	(Германия)	(Япония)	(Япония)
Название	Coolpower	Coolpower	SRDK-415D	SRDK- 408S2
модели	4.2GM	10 MD		
Мощность	45Вт (50 К)		45/35 Вт (50 К)	40/35 Вт (45 К)
охлаждения:	(60Гц /50Гц)	25 Вт (40 К)	(60Гц /50Гц)	(60Гц /50Гц)
Первая ступень				
Вторая ступень	1 Вт (4.2 К)	15 Вт (17 К)	1.5 Вт (4.2 К)	6.3/5.4 Вт (10 К)
	(60Гц /50Гц)		(60Гц /50Гц)	(60Гц /50Гц)
Минимальная	35 K	30 K	30 K	30 K
температура:	(60Гц /50Гц)			
Первая ступень	3 K	8 K	2.8 К	7 К
Вторая ступень	(60Гц /50Гц)			
Bec	14 кг	14 кг	18.5 кг	17.2 кг
Компрессор	COOLPACK	COOLPACK	CSW-71C	CSW-71C
	6200 MD	6200 MD		
Обслуживание	12 месяцев	12 месяцев	14 месяцев	14 месяцев

В устройствах, работающих по циклу Гиффорда-МакМагона, не удаётся избежать использования движущихся составных частей в холодной головке. Это является недостатком охладителей на их основе, так как при этом неизбежны механические вибрации, а так же пульсации температур с амплитудой ~0.4 К. Альтернативой могут являться криокулеры на основе вихревых трубок (от англ. "Pulse Tube"). Главная их особенность – это отсутствие движущихся частей в холодильной головке, которая состоит из простой полой трубки. Осциллирующий в ней газ работает как газовый поршень. Производительность вихревой трубки главным образом определяется контролем над фазой движения этого газового поршня. Так отсутствие движущихся частей в холодной головке привело к более простой технологии их изготовления, существенному подавлению вибраций и простоте интеграции в другие системы. Однако криокулеры на основе вихревых

трубок пока проигрывают в холодильной мощности традиционным устройствам. Поэтому наш выбор для использования в качестве охладителя был остановлен на лучших по характеристикам, по состоянию на начало 2000-х, моделях криокулеров работающих по циклу Гиффорда-МакМагона.



b)


Рисунок 137. Нагрузочные кривые криокуллеров: a) Leybold Coolpower 4.2 GM; b) Leybold Coolpower 10 MD; c) Sumitomo RDK-415D; d) Sumitomo RDK-408S2.

4.4. Использование криокулеров для реконденсации гелия

Отказываясь от использования жидкого азота и переходя на охлаждение экранов криокулерами, имеющими головки с температурами 60К и 20К, логично было воспользоваться возможностями и других промышленно выпускаемых криокулеров, имеющих головки с температурой 4К и 60К. Поэтому была предложена идея интегрировать в конструкцию криостата, кроме одного криокулера, используемого для охлаждения экранов, ещё два криокулера с 4К ступенью непосредственно для охлаждения гелия. Применение именно двух 4К криокулеров определялось, в первую очередь, балансом мощности в криостате, так как в то время коммерчески доступные модели имели максимальную холодильную мощность, не превышающую 0.5 Вт, а расчётная величина теплопритоков в гелий составляла ~1Вт. Первый опыт использования таких криокулеров был осуществлён на вигглере, который был установлен ИЯФ СО РАН в 2000 году на накопителе Spring-8 (Япония) [112]. Внешний вид этого криостата представлен на Рисунке 138.



Рисунок 138. Внешний вид криостата 10 Тл шифтера для накопителя Spring-8 с использованием криокулеров с 4К ступенью.

Предполагалось, что если поместить в объем с гелием холодный теплообменник с температурой, близкой к 4К, то газообразный гелий будет конденсироваться на холодной поверхности и стекать обратно в гелиевый сосуд в виде капель жидкости. Поэтому в первом варианте на корпусе криостата были размещены два криокулера, с прикреплёнными на второй 4 К ступени медными головками теплообменников, которые через сквозные колодцы, образованные стенками нержавеющих сильфонов, целиком вставлялись непосредственно в верхнюю часть гелиевого сосуда, как это показано на Рисунке 139. Головка теплообменника, показанная на Рисунке 140, представляла собой медный диск, к были припаяны многочисленные медные стержни для увеличения которому эффективности теплообмена за счёт повышения площади холодной поверхности. В качестве припоя был использован высокотемпературный серебряный припой ПСР-45. Головка была целиком пассирована электрогальванически с помощью олововисмута для защиты меди от коррозии. Никакой дополнительной обработке после осуществления пайки, кроме ультразвуковой мойки, этот теплообменник не подвергался. Тепловой контакт теплообменника с холодильной головкой был осуществлён с помощью индиевой фольги толщиной 0.1 мм. При этом сами ступени криокулеров также целиком находились непосредственно в газообразном гелии в верхней части гелиевого сосуда. Такая конструкция позволила достигнуть, казалось бы, неплохого расхода жидкого гелия на уровне <1 л/час при температуре второй ступени ~ 3.3 К.





Рисунок 140. Медный теплообменник, пассивированный олововисмутом..

Рисунок 139. Установка 4К криокулеров в гелиевый сосуд криостата.

Однако, судя по нагрузочной кривой криокулер, а можно было сделать вывод о том, что холодильная мощность использовалась не эффективно. Такой режим

работы соответствует использованию всего лишь 20% от максимального значения холодильной мощности и составлял 0.2 Вт вместо 1Вт. Иными словами, так как не был обеспечен эффективный механизм по отбору мощности от испарённого гелия, то холодильная головка работала в «недогруженном» режиме и испарённый гелий беспрепятственно выходил из гелиевого сосуда наружу криостата.

На основе этих предположений была сформулирована задача, решение которой должно было привести к существенному снижению расхода жидкого гелия. А именно, создать такие условия, при которых максимально возможная тепловая нагрузка от испарённого гелия подводилась бы ко второй 4К ступени криокулера для реконденсации в жидкость.

Поэтому для увеличения площади поверхности теплообмена с газообразным гелием следующий теплообменник был изготовлен из большого числа медных пластин, как показано на Рисунке 141. Однако эффективность теплообмена не В качестве предполагаемой причины «недогруженности» криокулера изменилась. было выдвинуто предположение о том, что, во-первых, применённые конструкции не обеспечивают достаточного охлаждения, так как теплообменников имеют пониженную теплопроводность из-за промежуточного паяного контакта, а воповерхность теплообменников вторых, возможно, имеет значительную шероховатость и загрязнения, препятствующие конденсации капель жидкости и стеканию их обратно в гелиевый объем. Необходимо отметить, что при проектировании различных низкотемпературных элементов криостата всегда требуется уделять особое внимание используемым промежуточным тепловым контактам и материалам, так как свойства многих из них недостаточно хорошо известны при криогенных температурах. Например, достоверно оценить качество паяного теплового контакта и перепада температур на нем было весьма затруднительно. Следующим шагом стало изготовление теплообменника из прямоугольной медной шинки с остаточным сопротивлением RRR (от англ. Residual Resistance Ratio) ~100 и с хорошей обработкой поверхности полированием. Внешний вид такого теплообменника изображён на Рисунке 142. Однако простая замена одного теплообменника на другой также не привела к заметному снижению

расхода жидкого гелия, который продолжал оставаться на уровне 1 л/час а температура второй ступени криокулера оставалась на уровне 3.3 – 3.5К.



Теплообменник

141.

Рисунок

листовой меди.



Рисунок 142. Медный теплообменник из из прямоугольной шинки, закреплённый на криокулер через индиевую фольгу.

Далее было предпринято ещё несколько последовательных шагов, которые предположительно могли улучшить ситуацию. Например, для исключения возможного конвективного теплообмена непосредственно между двумя ступенями криокулера через потоки газообразного гелия, в котором он располагался конструктивно, были применены горизонтальные теплоотражающие экраны из отражающего материала, как это показано на Рисунке 143. Набор экранов с подобной конструкцией иногда применяется так же для уменьшения теплопритока через центральную горловину в сосудах Дьюара для хранения жидкого гелия. Однако это изменение так же никак не повлияло на уменьшение расхода гелия.



Рисунок 143. Дополнительные теплоотражающие экраны между первой и второй ступенями криокулера для ограничения конвективного теплообмена.

была высказана идея Поэтому радикально устранить возможный конвективный теплообмен между ступенями криокулера, конструктивно изолировав его от непосредственного контакта с гелием. Для этого на примере следующего сверхпроводящего шифтера ВАМ, который был установлен и уже работал на источнике СИ BESSY-II (Берлин, Германия) с 2000 года [111], была осуществлена изоляция криокулера от газа с использованием стенки уже существующего в данном криостате нержавеющего сильфона, в дно которого был герметично впаян промежуточный медный диск (см. Рисунок 144). При этом сам медный теплообменник, продолжающий находиться внутри гелиевого сосуда, охлаждался от 4К ступени контактным способом через этот медный диск, а тепловой контакт между ступенью криокулера и медным диском осуществлялся через индиевую прокладку. Механическое усилие для раздавливания индиевой прокладки было обеспечено резьбовым соединением через шпильку в центре медного диска путём закручивания всего корпуса криокулера целиком в криостат через медный адаптер с резьбой (см. Рисунок 145). Такое неоднозначное техническое решение было принято в связи с весьма ограниченным доступом снаружи к месту теплового контакта на существующем криостате, поэтому осуществить соединение можно было, только закручивая целиком весь корпус криокулера в криостат «вслепую».



Рисунок 144. Шпилька в днище сильфонного колодца для соединения с 4К головкой криокулера.



Рисунок 145. Адаптер с внутренней на 4К ступени криокулера для соединения с теплообменником в гелиевом сосуде.

Для того чтобы уменьшить конвективные потоки газа, которые могли бы препятствовать процессу реконденсации гелия непосредственно на холодной поверхности теплообменника, было предложено локально изолировать поверхность теплообменника от прямого контакта с газом внутри гелиевого сосуда. Для этого непосредственно на медный теплообменник был закреплён цилиндрический кожух из тонкой нержавеющей стали, имеющий многочисленные отверстия в верхней поступления газообразного гелия части для И воронку ДЛЯ стекания сконденсированной жидкости в нижней части кожуха, как это изображено на Рисунке 146.



Рисунок 146. Воронка для реконденсации и стекания жидкого гелия.

Отметим, что в данной конструкции весь криокулер был целиком заключён в отдельный герметичный вакуумный объем, не связанный с защитным вакуумом криостата и окружающей атмосферой, а вакуумирование этого объёма происходило автоматически при вымерзании газа непосредственно на головках работающего криокулера. Такое решение, конечно, выглядело весьма спорным, но зато позволило существующую конструкцию использовать уже криостата для оперативной Для устранения проверки самой идеи. ЭТОГО недостатка В следующем сверхпроводящем шифтере PSF, установленном так же на накопителе BESSY-II в 2001 году [110], криокулер был помещён уже непосредственно в объем с защитным вакуумом, а контакт теплообменника, находящегося в гелиевом сосуде, с 4К ступенью криокулера осуществлялся через герметичную сильфонную развязку, как это показано на Рисунке 147.



Рисунок 147. Конструкция криостата PSF (криокулер 4К расположен в вакууме).

Однако все вышеперечисленные действия, связанные с попыткой устранить возможное отрицательное влияние конвективного теплообмена между ступенями криокулеров на эффективность реконденсации гелия, не принесли сколько-нибудь заметного результата в уменьшении расхода гелия, который в лучшем случае снижался до 0.9 л/час. Отсюда был сделан вывод том, что если конвективные процессы и присутствуют в общем балансе теплопритоков, то они не являются определяющими и не оказывают заметного влияния на фоне других механизмов теплообмена, которые реально определяют общий расход гелия. Поэтому следующим логичным объектом для исследования причин повышенного расхода гелия стали токовводы, по которым осуществлялась запитка сверхпроводящего магнита электрическим током.

4.5. Использование керамических ВТСП сверхпроводящих токовводов

Очевидно, что в общем балансе теплопритоков в рассматриваемых выше криостатах основную долю мощности, приводящей к испарению жидкого гелия, вносят токовводы. Как уже упоминалось в Главе 4.1.1, для ввода тока была использована общепринятая концепция оптимизированного медного токоввода, охлаждаемого парами гелия, испарённого теплом от самого токоввода. Оптимизация геометрии такого токоввода (сечения и длины) состоит в минимизации суммарных притоков тепла как по теплопроводности самого токоввода, так и от джоулева нагрева протекающим током. Такая схема была хорошо описана в литературе [50] и повсеместно использовалась в различных криостатах в качестве стандартного способа ввода тока. Различия касались лишь некоторых нюансов конструкции, например, конкретного способа обеспечения теплообмена внутри такого токоввода с охлаждающим газом. Однако, использование такой схемы ввода тока жёстко задавало и минимально возможный предел по расходу жидкого гелия, который при использовании четырёх токовводов с током 150 А, не мог быть меньше, чем 0.9 л/ч, как было показано в Главе 4.1.1. Понизить эту величину можно было только дополнительным охлаждением с использованием криокулеров с температурой 4 К. Однако в описанных выше конструкциях криостатов использование криокулеров пока было не эффективным и давало минимальный расход на уровне 0.8 – 0.9 л/ч. Поэтому ограничение со стороны токовводов лишало смысла любые дальнейшие усовершенствования криогенной системы по уменьшению теплопритоков.

Следует отметить, что на этот момент в конструкции последних вигглеров, произведённых в ИЯФ СО РАН, все остальные каналы притока тепла уже были практически минимизированы до предела. Так применение кевлара ограничивало теплоприток по элементам подвески на уровне менее 0.01 Ватт. Доля мощности от теплового излучения не превышала 1 мВт благодаря использованию двух тепловых экранов с многослойной криогенной суперизоляцией. Приток по остаточному газу не превышал 1 мВт, так как давление в защитном вакууме было не более 10⁻⁷ мбар, благодаря тому, что холодные поверхности криостата играли роль криогенного насоса.

Исходя из этого, был предложен следующий шаг по снижению притока тепла теперь уже по токовводам путём использования в цепи ввода тока вставки из ВТСП токовводов, которые к тому времени уже стали серийно выпускаться промышленностью. Например, гарантированный приток тепла по токовводам с номинальным током 250 A фирмы CryoSaver оставляет всего 57 мВт при

К, температуре «тёплого» конца 64 что радикально снижало расчётные гелий. В Таблице 4.2 представлены теплопритоки В жидкий основные характеристики промышленно выпускаемых ВТСП токовводов фирмы CryoSaver.

Номинальный ток (при 64К),	Диаметр, мм	Длина, мм	Расчётный теплоприток	Расчётная механическая прочность		
A			на пару (64К- 4.2К), мВт	Сжатие, Н	Растяжение, Н	Кручение, Н
150	9.5	305	32	200	1500	7
250	11.1	305	57	400	2000	11
500	14.3	305	130	1100	2500	18
1000	19.1	347	212	340	4000	38

Таблица 4.2. Основные характеристики ВТСП токовводов.

Очевидно, обеспечения рабочего что для температурного режима необходимо было поддерживать на таком ВТСП токовводе температуру не выше температуры кипения жидкого азота – 80К, а лучше – более низкую. Следовательно, напрашивалась такая схема подключения ВТСП токоввода, в которой один из его концов (нижний) находился бы при гелиевой температуре и имел непосредственный электрический контакт с обмотками сверхпроводящего магнита, а второй (верхний) должен имеет гарантированную температуру, не превышающую 80К. При этом электрически соединялся уже с обычным оптимизированным верхний конец медным токовводом (см. Рисунок 148), по которому ток подводится снаружи криостата, как это изображено на Рисунке 149.



Рисунок 148. Оптимизированные медные газоохлаждаемые токовводы с гибким переходником для контакта с ВТСП токовводами.



Рисунок 149. Конструкция узла ввода тока с использованием ВТСП токовводов и газоохлаждаемых медных токовводов.

Естественно, что в таком случае появляется некоторая особенность в работе криостата в виде довольно ненадёжного элемента в виде ВТСП токоввода, который почти гарантированно разрушается при превышении критических параметров по величине тока и температуре. Поэтому текущая температура верхнего конца ВТСП токоввода должна обязательно контролироваться термодатчиком, по сигналу с которого будет приниматься решение о выключении тока при повышении температуры выше критической. Дополнительный сигнал блокировки можно получать так же измеряя электрическое напряжение на концах ВТСП токоввода, которое будет возрастать при начале перехода тёплого сверхпроводника в нормальное состояние. Характерные напряжения начала потери сверхпроводимости ВТСП токоввода составляют ~1 мВ, после чего начинается необратимый рост нормальной зоны, как это изображено на Рисунке 150, где представлена вольт – амперная характеристика одного из ВТСП токовводов с

191

номинальным рабочим током 500 А. При этом сгорание ВТСП токоввода при потере сверхпроводимости от протекающего по нему тока является практически неизбежным и в качестве примера на Рисунке 151 приведены несколько таких токовводов, вышедших из строя при различных обстоятельствах, приведшим к выходу их из сверхпроводящего состояния.



Рисунок 150. Вольт-амперная характеристика ВТСП токоввода.



Рисунок 151. ВТСП токовводы, сгоревшие при различных обстоятельствах при запитываниии криостатов электрическим током.

Использование параллельного электрического шунта для защиты от сгорания ВТСП токоввода при потере сверхпроводимости токоввода конечно же допустимо, однако в этом случае возникают следующие особенности:

1. Появляется дополнительный постоянный теплоприток в жидкий гелий по шунту, который будет снижать эффект от применения ВТСП токоввода. Например, если в качестве основного требования при выборе параметров шунта в виде проволоки из нержавеющей стали ограничить температуру его нагрева ~ 100 К (выше которой уже начинает работать термическое температурой расширение материалов и может происходить растрескивание паяного соединения) и если допустить, что в ВТСП токовводе произошла потеря сверхпроводимости одновременно с переходом в нормальное состояние самого магнита, то при характерном времени затухания тока в магните т ~ 1 с, для тока 250 А шунт должен иметь диаметр не менее 2 мм при длине 200 мм. В этом случае при стационарной приток тепла по шунту в жидкий гелий при рабочей температуре его работе верхнего конца 80 К даст дополнительный вклад ~20 мВ с каждого токоввода, что уже сравнимо с его собственным теплопритоке ~28 мВ.

2. Более того, так как степень нагревания шунта непосредственно определяется длительностью протекания по нему тока до полного затухания, то температура шунта может легко достичь и температуры плавления припоя (~120 C), если не предпринять специальных мер для быстрого спадания тока в цепи сверхпроводящего магнита. Иначе время затухания, которое определяется как т~L/R, может быть довольно длительным. Здесь где L – индуктивность магнита (обычно более 1 Гн), а R – некоторое эквивалентное сопротивление цепи. При этом при отсутствии собственно перехода в нормальное состояние самого магнита, затухание будет происходить только на сопротивлении подводящих проводов (несколько Ом) и может достигать длительности нескольких минут. Для принудительного ускорения затухания тока можно использовать, например, специальный нагреватель магнита, быстро выводящий обмотки в нормально-проводящее состояние, который должен подключаться по сигналу блокировки. Либо можно принудительно замыкать ток на специальный резистор для поглощения энергии, размыкая при этом цепь

источника питания. Возможно так же использование двух-квадрантного источника питания. В любом случае, такие меры требуют дополнительных электронных элементов, снижающих надёжность и значительно усложняющих систему управления и защиты.

Тем не менее, несмотря на дополнительные сложности, выгода от применения ВТСП токовводов, с точки зрения экономии жидкого гелия, безусловно не вызывает сомнений. И одним из первых опытов по использованию таких токовводов был осуществлён на вигглере ВАМ [102], установленном на накопителе BESSY-II. Конструкция узла ввода тока с использованием ВТСП токовводов уже была представлена на Рисунке 149, а на Рисунке 152 показан внешний вид этого узла. был расположен непосредственно в газообразном гелии в Узел ввода тока центральной горловине криостата, соединяющей гелиевый сосуд с наружной атмосферой. Сверхпроводящие шинки, выходящие с обмоток магнита, припаяны к нижнему концу ВТСП токоввода. Верхний конец ВТСП токоввода соединяется с гибкий медный переходник, обеспечивающий медным токовводом через механическую развязку хрупкого керамического токоввода от термических деформаций. Судя по данным производителя, приведённым в Таблице 4.2, слабым местом, с точки зрения механической прочности у ВТСП токовводов является крутящие усилия (~7 Н для 150 А токоввода). Для стабилизации температуры верхнего конца ВТСП токоввода на безопасном уровне ~ 80 К переходник медным гибким тепловодом, имеющим тепловой контакт охлаждается с радиационным экраном криостата, как показано на Рисунке 153. При этом электрически тепловод был изолирован от экрана посредством изоляционной пластины из бериллиевой керамики толщиной 1мм, которые обычно используется для охлаждения радиоаппаратуры. Выбор именно этого изолятора, кроме конструктивного удобства был обусловлен ещё и тем, этот материал имеет в диапазоне температур 60 – 120 К пик теплопроводности, сравнимый с медью $(RRR=20) \sim 800 \text{ Bt/m/K}.$





Рисунок 152. Узел ввода тока с Рисунок 153. Верхние медные использованием ВТСП токовводов токовводы в узле ввода тока с гибкой (нижняя часть). токовой и тепловодной развязками.

Использование ВТСП токовводов позволило существенно снизить приток тепла в гелий и уменьшить расход до уровня ~0.5 л/ч. Однако и этот результат оказался значительно выше расчётного. Для поиска причин такого несовпадения были последовательно проведены несколько изменений конструкции узла ввода тока с последующими испытаниями. Например, то ожидаемое преимущество, которое вроде бы даёт расположение токовводов непосредственно в газообразном гелии (в виде надёжной стабилизации их температуры за счёт охлаждения через оказаться и недостатком. В частности, было сделано поверхность), могло предположение, что вертикальном колодце, образованном сильфоном центральной горловины криостата, в котором были расположены токовводы, возможно образование «паразитных» газовых потоков, переносящих тепло в жидкий гелий. Для устранения возможности такого теплообмена были внесены следующие изменения:

 В горловине были размещены дополнительные горизонтальные медные экраны, покрытые несколькими слоями суперизоляции для выравнивания температур, как показано на Рисунке 154;

2. Все измерительные провода, идущие внутрь гелиевого сосуда, были значительно увеличены по длине для уменьшения теплопритока и снабжены дополнительными теплоперехватами на холодные поверхности экранов, как показано на Рисунке 155.

195



Рисунок154.Дополнительныегоризонтальныемедныеэкраныцентральной горловиныкриостата



Рисунок 155. Размещение удлинённых сигнальных проводов в горловине криостата для снижения теплопритока в жидкий гелий

3. Для разрывания вертикальных конвекционных потоков были установлены горизонтальные перегородки, имеющие обратные клапаны, показанные на Рисунке 156, позволяющие выпускать газ из гелиевого сосуда в случае потери сверхпроводимости, но препятствующие доступу горячего газа в жидкий гелий. Кроме того, весь свободный объем между этими перегородками был заполнен кусочками мелкого пенопласта;

4. Устроены лабиринты для прохода газа, препятствующие прямому попаданию излучения с верхней части криостата в гелий;

5. Поверхности токовводов были изолированы от непосредственного теплового контакта с газом с помощью пенопласта;



Рисунок 156. Обратные клапаны в горловине криостата для прерывания конвекционных потоков в жидкий гелий (открываются при потере сверхпроводимости для сброса гелия).

196

Однако все вышеперечисленные действия не привели к какому-либо заметному эффекту, и расход гелия продолжал оставаться на уровне ~0.5 л/час. Поэтому в качестве следующего шага по уменьшению расхода жидкого гелия было предложено уменьшить долю тепла, определяемую протеканием тока по токовводам и изучить возможность использования режима замороженного тока.

4.6. Исследование работы вигглера в режиме замороженного тока

Для исследования возможности дальнейшего уменьшения теплопритока в жидкий гелий и принимая во внимание то, что основная доля тепла поступает в гелий именно от системы ввода тока в магнит (в том числе - и от выделения джоулева тепла при протекании тока) было предложено использовать режим замороженного тока. В основе способа запитывания сверхпроводящего магнита в режиме замороженного тока лежит возможность замыкать ток, протекающий через сверхпроводящую обмотку непосредственно внутри криостата, отключив его от наружного источника питания. В этом случае можно исключить из баланса теплопритоков долю, определяемую протеканием тока через токовводы. Ток можно замкнуть через сверхпроводящую перемычку, которая, как и магнит, находится в жидком гелии и играет роль сверхпроводящего ключа, подключённого параллельно основным обмоткам и источнику питания. Во время подъёма тока, протекающего через обмотки, эта перемычка должна находиться в «разомкнутом» состоянии, что обеспечивается подключением специального нагревателя, намотанного непосредственно на некотором участке провода перемычки и поддерживающего на ней температуру, соответствующую нормальной проводимости. После установки тока на необходимом уровне нагреватель ключа отключается и перемычка переходит в сверхпроводящее состояние. Далее, при уменьшении величины тока в источнике питания до нуля, ток, равный ему по величине автоматически переходит в сверхпроводящую перемычку и, следовательно, замыкается внутри криостата. Таким образом, происходит «замораживание» тока и исчезает поступление джоулева тепла в жидкий гелий. Упрощённая схема запитки обмоток трёхполюсного шифтера PSF [110], установленного ИЯФ СО РАН НА накопителе BESSY-II, на

котором были использованы сверхпроводящие ключи для режима замороженного тока, изображена на Рисунке 157.



Рисунок 157. Упрощённая схема запитки обмоток трёхполюсного шифтера PSF с использованием сверхпроводящих ключей для режима замороженного тока.

Отметим, что в таком режиме возможно произвести даже полное механическое отмыкание наружных токовводов от внутренней цепи магнита, не нарушая при этом режим его работы и не меняя величины «замороженного» тока в магните. Таким образом, можно было бы исключить даже приток тепла в гелий и через теплопроводность наружных медных токовводов. Однако эта процедура была осуществлена позднее, а в данном случае была изучена собственно сама возможность работы в режиме замороженного тока.

4.6.1. Система подкачки тока

Предполагая заранее то, что замороженный ток будет неизбежно затухать с некой постоянной времени, зависящей от остаточного сопротивления несверхпроводящих контактов, соединяющих обмотки между собой, в конструкции была заранее предусмотрена система подкачки тока для компенсации потерь на затухание. Идея системы подкачки, компенсирующей деградацию поля в магните, состояла в использовании трансформатора подкачки тока. Вторичная обмотка трансформатора соединялась гальванически непосредственно со сверхпроводящей обмоткой магнита, а на первичную обмотку подавался импульс тока подкачки, который посредством управляемых сверхпроводящих ключей передавался во вторичную цепь трансформатора, изменяя при этом ток в обмотке магнита на необходимую величину. При этом использовались одновременно два трансформатора подкачки тока, отдельно в цепи каждого из двух источников питания. На Рисунке 158 представлена упрощённая схема системы подкачки тока.



Рисунок 158. Схема подкачки тока в сверхпроводящие обмотки вигглера.

Эта система состоит из двух идентичных подсистем для цепей тока I1 и I2, которые соединяются с обмотками магнита последовательно с основными сверхпроводящими ключами PK1 и PK2 и, по сути, представляют собой выпрямители. Подсистема тока I1 включает в себя сверхпроводящие ключи RK1 и RK2 и трансформатор T1. Подсистема тока I2 состоит из сверхпроводящих ключей RK3 и RK4 и трансформатора T2. Алгоритм работы системы подкачки тока состоит в следующем. Для добавления кванта тока в одну из цепей на первой стадии включается нагреватель одного из сверхпроводящих ключей, например RK1 на

время ~0.3 сек. В результате ключ RK1 размыкается. Пусть железный сердечник трансформатора в этот момент находится в насыщенном состоянии. Перед моментом окончания нагрева ключа на первичную обмотку трансформатора Т1 подаётся импульс напряжения амплитудой ~4В, в результате которого сердечник трансформатора выходит из насыщенного состояния и затем перемагничивается в противоположном направлении вновь до насыщенного состояния. В результате такого скачка магнитного потока, происходящего внутри сердечника, вокруг которого намотана вторичная обмотка трансформатора, в цепи сверхпроводящего магнита I1 через замороженный ключ RK2 проходит импульс напряжения амплитудой ~10 мВ и на сверхпроводящую обмотку магнита добавляется «квант» тока. Для добавления следующей порции тока включается нагреватель ключа RK2. На первичную обмотку трансформатора подаётся импульс противоположной полярности, который вновь перемагничивает сердечник и насыщает его в первоначальном направлении, а в обмотку магнита через замороженный ключ RK1 добавляется очередная порция тока. Амплитуда одной такой порции составляет ~ 10-15 мА. На Рисунке 159 показан внешний вид трансформатора подкачки тока, а на Рисунке 160 показан один из таких трансформаторов, установленных на сверхпроводящем магните.



Рисунок 159. Внешний вид двух трансформаторов подкачки тока для системы замороженного тока.



Рисунок 160. Трансформаторы подкачки тока, установленные на сверхпроводящем 45-полюсном 3.5Tл магните вигглера для накопителя ELETTRA.

Такая система подкачки тока была использована для стабилизации уровня магнитного поля на нескольких трёхполюсных шифтерах, созданных в ИЯФ СО РАН, например на шифтере ВАМ на накопителе BESSY-II [107]. Особенностью данного шифтера является использование его в качестве эталонного источника синхротронного излучения для метрологических измерений, что накладывало жёсткие требования не только на стабильность орбиты, но и на точность установки и долговременной стабилизации уровня магнитного поля. Поэтому для точного измерения уровня поля здесь были применены несколько датчиков ЯМР, расположенных в необходимых местах в магнитном зазоре вигглера. Особенности стабилизации магнитного поля с помощью ЯМР датчиков на сверхпроводящих вигглерах, созданных в ИЯФ СО РАН, подробно описаны в работах [104, 105].

Как уже отмечалось ранее для запитывания обмоток сверхпроводящих вигглеров мы обычно используем две независимых цепи источников тока. Вернувшись к Рисунку 157, где представлена упрощённая схема запитки обмоток, легко заметить, что ток одной из цепей I2 протекает только через наружные (L2u, L2d) и внутренние (L1u, L1d) обмотки центрального полюса. Другой же источник I1 не только добавляет ток в наружные обмотки центральные полюса (L2u, L2d), которые позволяют пропускать больший ток, находясь в меньшем магнитном поле, но и запитывает боковые полюса (Ls1, Ls2, Ls3 и Ls4), предназначенные для замыкания орбиты пучка. Такая схема позволяет точно подгонять соотношение токов в обмотках для перераспределения поля вдоль оси магнита и, соответственно, зануления интегралов поля и замыкания орбиты электронного пучка. Однако оборотной стороной использования такой схемы является взаимное влияние обоих контуров друг на друга, благодаря высокой взаимной индуктивности.

4.6.2. Прецизионная стабилизация поля с помощью датчиков ЯМР

Для точного определения величины магнитного поля в вигглере использовался импульсный метод измерения ЯМР. Известно, что вектор собственного магнитного момента ядер некоторых веществ, будучи помещёнными в постоянное магнитное поле, начинает вращаться вокруг направления внешнего поля с частотой прецессии, зависящей от уровня магнитного поля. Если ядра подвергаются воздействию короткого радиочастотного импульса, поступающего на катушку, намотанную вокруг ампулы с веществом, и частота импульса близка к частоте прецессии, то магнитные моменты ядер возбуждаются и наводят в катушке ЭДС, сигнал от которого постепенно спадает к нулю по мере возвращения магнитных моментов в состояние равновесия (этот процесс называется магнитной релаксацией).

Процесс измерения величины магнитного поля *B* с помощью ЯМР состоит в возбуждении с помощью электромагнитного импульса, подводимого к датчику снаружи, ядер рабочего вещества датчика, характеризуемого гиромагнитным отношением γ [МГц/Тл], которое является физической константой и хорошо известно для различных ядер. Частота импульса должна быть близка к частоте резонанса используемого материала. Затем измеряется частота ответного резонансного сигнала спинового эха *F*_{ЯМР}[МГц]. Эти три параметра связаны между собой следующим соотношением:

$$B[T_{\pi}] = F_{\rm SMP} / \gamma \tag{4.10}$$

Таким образом, можно определить величину магнитного поля, измеряя резонансную частоту ЯМР. Отметим, что как возбуждающий, так и ответный резонансный сигналы проходят по одному и тому же высокочастотному кабелю, подводимому снаружи криостата в область измерения поля.

Два ЯМР датчика (ЯМР1 и ЯМР2), имеющие чувствительную зону 1 мм в диаметре и 3 мм длиной, были расположены вдоль вертикальной оси в отверстии железного керна центрального полюса, которое имеет диаметр 6 мм. Ещё по одному датчику (ЯМР3 и ЯМР4) с размерами 1.5 х 2 х 3 мм были размещены в районе боковых полюсов. Схема расположения датчиков ЯМР представлена на Рисунке 161.



Рисунок 161. Схема размещения датчиков ЯМР в магнитном зазоре трёхполюсного шифтера PSF на накопителе BESSY-II.

Отметим, что необходимым условием для работы ЯМР датчика является хорошая однородность магнитного поля, в котором он находится (обычно не хуже чем 0.1%). Поэтому необходимо было заранее определить области однородности поля в магните, в которых обеспечивалась бы необходимая точность измерения датчиками ЯМР. Именно поэтому в центральном полюсе было установлено два датчика, так как при изменении уровня поля в центральном полюсе от минимального до максимальных 7 Тл область однородности перемещается дальше от медианной плоскости, благодаря эффектам насыщения железа. Отметим, что для разных диапазонов, измеряемых в вигглере магнитных полей, необходимо было использовать датчики ЯМР, основанные на различных материалах, ядра которых наиболее подходят для каждого уровня поля. Так для измерения высоких уровней поля в центральном полюсе (от 2 до 7.5 Тл) использовались датчики на основе порошка алюминия (у=11.094 МГц/Тл), а для измерения в боковых полюсах (от 0.35 до 1.5 Тл) использовались ядра фтора, находящиеся во фторопласте (у=40.0546 МГц/Тл). Таким образом, измерения проводились на резонансных частотах ~ 60 - 80

МГц, которые были наиболее удобны с точки зрения работы регистрирующей электроники. На Рисунке 162 показан внешний вид двух датчиков ЯМР, заключённых в железную капсулу, перед установкой их в центральный полюс сверхпроводящего магнита.



Рисунок 162. Капсулы с датчиками ЯМР перед монтажом в сверхпроводящий центральный полюс магнита.

Все 4 датчика ЯМР были предварительно откалиброваны по отдельному датчику ЯМР, временно установленному в вакуумной камере вигглера и расположенному в медианной плоскости. На Рисунке 163 приведена зависимость ширины пика измеряемого ЯМР сигнала от величины поля на медиане магнита. Ширина пика отвечает за точность измерения и определяется уровнем однородности поля, в котором находится датчик. Можно заметить, что область однородности с увеличением уровня поля мигрирует от датчика ЯМР2 к датчику ЯМР1. Поэтому для оптимизации точности измерения положение датчиков внутри железного полюса было заранее подобрано таким образом, чтобы датчик ЯМР2, находящийся ближе к медиане, измерял низкий уровень поля от 2 до 3.5 Тл, а датчик ЯМР1, расположенный дальше, работал в области высокого поля от 3.5 до 7.5 Тл.



Рисунок 163. Зависимость ширины резонансного пика датчиков ЯМР1 и ЯМР2 от величины поля на медиане.

Соотношения между добавками токов $\Delta I1$ и $\Delta I2$, создаваемыми трансформаторами подкачки, находящимися в токовых цепях магнита I1 и I2, и соответствующими значениями магнитного поля на медианной плоскости B_{med} , в центральном полюсе B_c и на боковых полюсах B_{side} можно записать как:

$$B_{med} = a1 \cdot \Delta I1 + a2 \cdot \Delta I2 \tag{4.11}$$

$$B_c = b1 \cdot \Delta I 1 + b2 \cdot \Delta I 2 \tag{4.12}$$

$$B_{side} = c1 \cdot \Delta I 1 + c2 \cdot \Delta I 2 \tag{4.13}$$

Коэффициенты a1, a2, b1, b2, c1 и c2 были найдены экспериментально для различных уровней поля. Зависимость этих коэффициентов от поля в вигтлере на медианной плоскости представлена на Рисунке 164 и Рисунке 165. Как следует из этих данных, величина поля на боковом болюсе B_{side} слабо зависит от тока I2, а определяется током I1, что вполне естественно, так как запитывается он именно током I1. Заметим также, что соотношение между токами I1 и I2 для каждого значения поля на медианной плоскости B_{med} должно удовлетворять ещё и условию равенства нулю первого и второго интегралов поля вдоль продольной оси вигглера для замыкания орбиты пучка.



Рисунок 164. Зависимость Рисунок 165. Зависимость коэффициентов a1, b1, u c1 от поля в коэффициентов a2, b2, u c2 от поля в медиане B_{med} .

После подъёма поля до нужного значения основные сверхпроводящие ключи PK1 и PK2 (см. Рисунок 158) замораживаются и токи *I*1 и *I*2 замыкаются через них в обход наружных источников питания, после чего источники питания могут быть отключены. Однако, вследствие затухания тока на несверхпроводящих контактах последовательно соединённых обмоток вигглера, происходит затухание токов и деградация поля. Экспериментальная зависимость скоростей деградации поля в характерных точках от величины выставленного поля в вигглере приведены на Рисунке 166. Используя эти зависимости и зависимости коэффициентов *a*1, *a*2, *b*1, *b*2, *c*1 и *c*2, связывающих величены полей с изменениями токов ΔI 1 и ΔI 2 от значения поля в вигглере. Из этих зависимостей представленных на Рисунке 167, очевидно, что ток из одной цепи перекачивается в другую. Причём этот эффект значительно возрастает с ростом поля в вигглере, так как мощность, выделяющаяся на несверхпроводящих контактах вигглера пропорциональна $P \propto I^2$.

Для компенсации этих изменений и стабилизации значений поля на центральном и на боковых полюсах использовалась система подкачки тока, которая с помощью трансформаторов тока добавляла порции тока в обе цепи. Благодаря сильной взаимной индуктивности между этими цепями каждая добавка тока в одну из цепей сопровождалась уменьшением тока в соседней цепи. На Рисунке 168 показана зависимость изменений поля на центральном и боковом полюсах вигглера от добавления одной ступеньки тока $\Delta I1$ при различных значениях поля на медиане B_{med} . Аналогичная зависимость от добавки тока $\Delta I2$ представлена на Рисунке 169.





Рисунок 166. Экспериментальная зависимость скорости деградации магнитного поля в измеряемых датчиками ЯМР точках для разных уровней поля *B_{med}* на медиане.

Рисунок 167. Зависимость скорости деградации токов *I*1 и *I*2 для разных уровней поля вигглера *B_{med}* на медиане.





Рисунок 168. Экспериментальная зависимость изменения поля на медиане вигглера при одном шаге подкачки по току Δ*I*1 на разных уровнях поля.

Рисунок 169. Экспериментальная зависимость изменения поля на медиане вигглера при одном шаге подкачки по току Δ*I*2 на разных уровнях поля.

После включения обратной связи программа стабилизации поля измеряет значения полей B_c в центральном полюсе и B_{side} в боковом полюсе и в случае отклонения этих значений от допустимых дает команду системе подкачки добавить порцию тока в соответствующую цепь. Примеры работы системы стабилизации поля вигглера на уровнях 4 Тл и 7 Тл в течение 8 часов представлены на Рисунке 170 и Рисунке171, соответственно.



Рисунок 170. Величина поля на центральном и боковом полюсе при включённой стабилизации в течение 8 часов на поле 4 Тл. Рисунок 171. Величина поля на центральном и боковом полюсе при включённой стабилизации в течение 8 часов на поле 7 Тл.

Из этих графиков можно заметить, что подкачка тока на поле 7 Тл включается гораздо чаще, чем на 4 Тл по причине более быстрой деградации поля из-за

увеличения потерь на контактах при большем токе. Величина ступенек в уровне поля от включения подкачки составляет 0.6 - 0.8 Гс на центральном полюсе и 1 - 2 Гс на боковом полюсе. Причём период между включениями подкачки укорачивается от 10 - 12 мин на уровне поля 4 Тл до 1 - 1.5 мин для 7Тл. При этом точность стабилизации уровня поля на центральном и боковых полюсах, от которой зависит как стабильность орбиты электронного пучка, так и предсказуемость параметров излучения оставалась не хуже, чем ~ $3 \cdot 10^{-5}$.

образом, опыт использования режима замороженного тока на Таким трёхполюсных шифтерах для уменьшения расхода гелия, связанного с нагревом показал, что, несмотря на то, что система измерения и управления токовводов, доказала свою полную работоспособность, использовать её было выгодно только до уровня магнитного поля не превышающего ~5-6 Тл. При увеличении уровня поля до 7 Тл и, соответственно, возрастания величины токов в обмотках, значительно увеличивалась деградация токов на несверхпроводящих контактах И перераспределение токов между токовыми цепями. В результате для коррекции этого эффекта требовалось увеличивать частоту включения системы подкачки токов и, таким образом, тепловой баланс смещался в сторону увеличения расхода гелия за счёт дополнительного нагрева сверхпроводящих ключей. В итоге расход гелия составлял те же 0.5 - 0.6 л/ч, что и в отсутствии системы замороженного тока.

4.6.3. Работа в режиме замороженного тока в многополюсном вигглере

Первый опыт использования системы стабилизации в режиме замороженного тока показал как его достоинства, так и недостатки. Поэтому для принятия для окончательного решения по поводу использования такой системы в дальнейшем была сделана попытка устранения недостатков системы подкачки тока, описанных в предыдущей Главе 4.6.2. Для этого была проведена оптимизация режимов работы сверхпроводящих ключей на предмет снижения мощности нагрева, необходимой для перехода в режим нормальной проводимости. После этого модернизированная система замороженного тока были установлена и опробована, теперь уже на многополюсном сверхпроводящем вигглере. Рассмотрим особенности работы такой системы на примере многополюсного вигглера, установленного ИЯФ СО РАН в 2002 году на источнике синхротронного излучения ELETTRA (Триест, Италия) [**116**, **117**]. Часть магнитной структуры и внешний вид этого вигглера представлены на Рисунке172 и Рисунке 173, соответственно.



Рисунок 172. Нижняя половинка 45полюсной магнитной структуры 3.5 Тл вигглера для накопителя ELETTRA.



Рисунок 173. 45-полюсный 3.5 Тл вигглер, установленный на накопителе ELETTRA.

Этот 45-полюсный вигглер с уровнем поля 3.5 Тл, в отличие от вышеописанного трёхполюсного шифтера, имел уже не десяток, а ~ 200 контактов между последовательно соединёнными двухсекционными обмотками. Очевидно, что это неизбежно усиливало эффект перекачки энергии через взаимную индуктивность и перераспределения токов между связанными цепями. Этот эффект увеличивался с ростом магнитного поля и, следовательно, величины токов. Магнитное поле на медианной плоскости вигглера также постоянно затухает по причине рассеяния энергии на контактах, и время затухания определяется уровнем магнитного поля. Например, для поля 1.5 Тл время затухания равно 4.4 года, а на поле 3.5 Тл это время составляет всего 77 дней. В обоих случаях на время измерений система стабилизации была отключена. Эти зависимости представлены в виде Таблице 4.3 и графически на Рисунке 174.

Таблица 4.3. Перераспределение токов в токовых цепях *I*1 и *I*2 и деградация магнитного поля в 45-полюсном 3.5 Тл вигглере на накопителе ELETTRA в режиме замороженного тока для различных уровней поля (подкачка токов отключена).

Магнитное поле, Тл	Δ <i>I</i> 2, мА/ч	Δ/1, мА/ч	Δ(<i>I</i> 1 – <i>I</i> 2), мА/ч	$\Delta B/B$, в час
1,5	+14,5	-33	-47,5	$-2,6\cdot10^{-5}$
2,5	-14,4	-42	-27,6	$-1,3\cdot 10^{-4}$
3	-135,6	+85,2	+221	$-2,4\cdot 10^{-4}$
3,5	-522	+522	+1050	$-5,4\cdot 10^{-4}$



Рисунок 174. Графики перераспределение токов в токовых цепях *I*1 и *I*2 и деградации магнитного поля в 45-полюсном 3.5 Тл вигглере на накопителе ELETTRA в режиме замороженного тока на разных уровнях поля.

Особенно сильно перераспределение токов происходило, начиная с поля 3.2 Тл до 3.5 Тл. К сожалению, используемая система подкачки также не смогла обеспечить одновременно стабильность первого интеграла поля и уровня поля в полюсах на постоянном уровне. Очевидно, что изменение величины первого интеграла тем меньше, чем меньше перераспределение токов, запитывающих обмотки полюсов и, следовательно, определяется разностью этих токов (I1 - I2). Стабильность же магнитного поля пропорциональна сумме этих токов (I1 + I2), так как именно их сумма определяет уровень поля на полюсах вигглера. Из этих двух величин приоритет был отдан стабильности орбиты пучка, а не уровню магнитного поля, так как именно нарушение орбиты влияет на работу всего накопителя в целом. Результат действия по такой стратегии представлен на Рисунке175, где показано отличие разности токов (I1 - I2) от среднего значения этой величины в течение 12часовой стабилизации первого интеграла поля. Можно заметить, что стабильность первого интеграла поля, обеспечивалась стабильностью разности токов (*I*1 – *I*2) на уровне 10 мА, что соответствовало нарушением орбиты не более, чем 1 мкм. Однако, недостаточная мощность используемого трансформатора подкачки токов приводила к тому, что на уровне поля 3.5Тл величина поля затухала с постоянной 175 времени лней. что соответствовало скорости уменьшения поля $\Delta B/B = 2.4 \cdot 10^{-4}$ в час, как это следует из Рисунка 176. Эта величина, несмотря на её очевидную малость, сравнимую с точностью стабилизации поля непосредственно подключёнными внешними источниками питания, имеет, тем не менее, монотонную направленность в сторону уменьшения поля. Следовательно, в течение характерного времени проведения экспериментов с синхротронным излучением, которое синхронизовано с перенакоплением электронного пучка 1-2 раза в сутки, уход поля уже становится довольно существенным и может составлять $\Delta B/B \sim 5 \cdot 10^{-3}$.

3.512 -



Магнитное поле, Тл 3.511 3.510 3.509 3.508 3.507 3 506 3 505 3.504 3.503 3.502 3.501 3.500 12 10 Время, ч

Рисунок 175. Отличие разности токов (I1-I2) от среднего значения в течение 12 часовой стабилизации первого интеграла поля в 45-полюсном вигглере ELETTRA.

176. Магнитное Рисунок поле В 12-часовой стабилизации течение первого интеграла поля в 45-полюсном вигглере ELETTRA.

На Рисунке 177 представлены графики спада токов *I*1 и *I*2 в процессе 12часовой стабилизации, из которых можно заметить, что разность этих токов (*I*1 – *I*2), определяющая стабильность орбиты в вигглере, строго соблюдается постоянной на протяжении всего периода стабилизации. Тем не менее, несмотря на полную работоспособность системы стабилизации токов в режиме замороженного тока, небольшой недостаток мощности трансформаторов подкачки создавал некоторые потенциальные неудобства для пользователей синхротронного излучения при работе на максимальном поле 3.5 Тл.

Что касается расхода гелия в криостате, уменьшение величины которого и являлось главной причиной применения режима замороженного тока, то, как можно увидеть из Рисунка 178, она стабилизировалась на уровне ~0.6 л/ч. Такой же расход гелия наблюдался и при запитке вигглера от внешних источников тока без использования режима замороженного тока. Однако, как легко заметить из Таблицы 4.4, где приведены величины расхода гелия в различных режимах работы вигглера, работа от внешних источников требовала дополнительного нагрева для размыкания основных сверхпроводящих ключей, что повышало расход до ~0.85-0.9 л/ч и делало использование такого режима неоправданным. К тому же, при использовании режима замороженного тока, расход приближался к тем же ~0.4-0.6 л/ч, что и в обычном режиме работы без использования сверхпроводящих ключей. Таким образом, был сделан вывод о том, что работа в режиме замороженного тока, возможна (особенно на небольшом уровне поля), однако требует дальнейшей оптимизации. Интересно отметить, что, как видно из Таблицы 4.4, расход гелия непосредственно во время подъёма (а равно и спуска) поля резко возрастал до ~1.7 л/ч, благодаря дополнительному нагреву обмоток и тела магнита индукционными токами.



Рисунок 177. Поведение токов *I*1 и *I*2 в Рисунок 178. Поведение величины процессе 12-часовой стабилизации в режиме расхода гелия во время 12-часовой замороженного тока. Разность токов стабилизации в режиме (*I*1 – *I*2) остается постоянной. замороженного тока на поле 3.5 Тл.

Таблица 4.4. Расход жидкого гелия при различных режимах работы 45полюсного 3.5 вигглера на накопителе ELETTRA.

Режим работы	Уровень магнитного	Расход гелия,
	поля, Тл	л/ч
Запитка от внешних источников	3.5	0.4-0.6
(сверхпроводящие ключи отсутствуют)		
Запитка от внешних источников	3.5	0.85-0.9
(сверхпроводящие ключи нагреты)		
Стабилизация токов	3.5	0.4-0.6
(сверхпроводящие ключи заморожены)		
Подъем и спуск поля за ~15 минут	0 -3.5	1.7

4.6.4. Особенности использования режима замороженного тока

Таким образом, в процессе настройки системы стабилизации в режиме замороженного тока стало очевидно, что увеличение точности стабилизации уровня

поля в вигглере должно также сопровождаться и увеличением частоты включения подкачки токов. А это неизбежно приводило к дополнительным притокам тепла и потерям жидкого гелия вследствие работы нагревателей сверхпроводящих ключей. И особенно сильно этот эффект проявлялся при работе на высоком уровне поля 3.5 Тл. При этом допустимая величина разбалансировки токов жёстко ограничена требованиями стабильности орбиты пучка.

Следовательно, можно было сделать вывод, что в целом работа в режиме замороженного тока и стабилизация поля с помощью трансформаторов подкачки тока снижает выделение тепла на токовводах и потери жидкого гелия. Поэтому использование пользование такого подхода, например, для обычных лабораторных сверхпроводящих магнитов может быть вполне оправдано. Однако использование этого режима для сверхпроводящих многополюсных вставных устройств, работающих на накопителях заряженных частиц, имеет свои особенности, ограничивающие их применения:

1. При использовании раздельных цепей запитывания обмоток (а такая схема даёт очень удобную возможность для увеличения максимального поле на ~15% и настройки интегралов поля) наличие взаимной индуктивности и, соответственно, перекачки энергии между цепями требует постоянной компенсации и, следовательно, увеличивает нагрев и расход гелия;

2. Особенностью именно многополюсных вигглеров является необходимость разместить как можно больше полюсов на доступной длине прямолинейного участка уменьшать количество слоёв провода в накопителя. Следовательно, выгодно обмотках сверхпроводящих для уменьшения ИХ продольного размера И компенсировать это увеличением силы тока в обмотках вплоть до ~ 1000 А. Но, в этом случае автоматически возрастает мощность потерь на соединениях между катушками, которая пропорциональны квадрату тока;

3. Особенно критичным нагрев становится опять же для многополюсных вигглеров, так как потери на большом количестве контактов (до нескольких сотен) значительно увеличивает скорость спада поля и вынуждает увеличивать частоту включения подкачки;

4. При использовании раздельных цепей запитывания обмоток токами одновременная стабилизация, как величины поля, так и интеграла поля, которые определяются суммой и разностью токов, соответственно, требует точной настройки мощности системы подкачки и баланса теплопритока, определяющего расход гелия.

Таким образом, при использовании режима замороженного тока в магните со сложной схемой запитки, в которой присутствует одновременно несколько источников питания, ток от которых суммируется на одних и тех же обмотках магнита, а так же существует большая взаимная индуктивность между этими участками обмоток, требуется очень аккуратно учитывать одновременно много факторов. Ввиду того, что выигрыш от использования режима замороженного тока может быть подавлен дополнительными потерями гелия на работу самой системы подкачки и, несмотря на полную работоспособность системы стабилизации и её соответствию требованиям по стабильности уровня поля и орбиты электронного пучка, от использования режима замороженного тока в дальнейшем пришлось отказаться.

4.6.5. Использование системы механического разрыва токовводов

При работе в режиме замороженного тока из баланса теплопритоков по токовводам исключается только та составляющая, которая зависит от джоулева нагрева. Это давало падение расхода гелия до 0.8 л/час при использовании стабилизации уровня магнитного поля с помощью подкачки и до 0.4 л/час при отключении системы стабилизации. Однако замораживание тока в магните внутри криостата в обход наружного источника питания в принципе даёт возможность избавиться так же и от тепла, подводимого в жидкий гелий непосредственно через теплопроводность самих токовводов. Поэтому на вигглере PSF, установленном на накопителе BESSY-II [107], была предпринята попытка использовать так же и механический разрыв токовводов. Для этого была создана механическая система, которая позволяла разорвать электрический контакт между нижним BTCП и
верхним медными токовводами и раздвинуть их на расстояние ~ 8 мм. Конструкция этой системы представлена на Рисунке 179.



Рисунок 179. Конструкция центральной горловины криостата с размыкаемыми медными и ВТСП токовводами.

С помощью системы рычагов, приводимых в движение двигателями постоянного тока, токовводы вытягивались из криостата вертикально на расстояние ~8 мм, ограниченное концевиками. Внешний вид этого механического привода, расположенного на верхнем фланце криостата, представлен на Рисунке 180. Ввод движения в гелиевый сосуд осуществлялся через герметичные сильфонные узлы, установленные отдельно на каждом из токовводов.



Рисунок 180. Система рычагов, производящих дистанционно механическое размыкание ВТСП и медных токовводов внутри гелиевого сосуде криостата.

Одной из главных проблем при создании этой системы стала разработка конструкции надёжного разрывного электрического контакта, работающего при криогенных температурах в газообразном гелии. Такой контакт должен был обеспечивать пропускание тока величиной несколько сотен ампер при многократных циклах размыкания и замыкания без потери качества соединения. Очевидно, что сопротивление такого контакта должно было быть достаточно мало по сравнению с обычным паяным контактом, так чтобы выделение тепла на нем при протекании тока не выделяло бы заметную мощность, испаряющую жидкий гелий, иначе бы В качестве контактных элементов, терялся смысл применения этой системы. изображённых на Рисунке 181 и на Рисунке 182, были использованы посеребрённые детали из стандартного электрического разъёма, рассчитанного на пропускание тока ~ 1кА, которые были впаяны в соответствующие части разрываемых токовводов. На Рисунке 183 представлен внешний вид ВТСП токовводов в процессе сборки, соединённых с магнитом в гелиевом сосуде криостата с помощью контактного узла, изображённого на Рисунке 184. Температура нижних концов наружных медных токовводов продолжала стабилизироваться посредством гибких медных тепловых перехватов на 60 К экран криостата, электрически изолированных с помощью пластин из бериллиевой керамики. Внешний вид верхних токовводов с элементами теплоперехвата представлены на Рисунке 185. Следует отметить, что данная

система ввода тока зарекомендовала себя как довольно надёжная и дополнительного нагрева за счёт присутствия в токовой цепи размыкаемых контактов не наблюдалось.





Рисунок 181. Разрывные контакты, соединённые с верхними концами ВТСП медных токовводов с размыкаемыми токовводов в процессе сборки.

Рисунок 182. Внешний вид верхних токовыми контактами.



183. ВТСП Рисунок Внешний ВИД токовводов, соединённые с магнитом в гелиевом сосуде, в процессе сборки.



Рисунок 184. Контактный узел с ВТСП системой токовводами И защиты обмоток при потере сверхпроводимости.



Рисунок 185. Внешний вид медных наружных токовводов с элементами теплоперехвата.

Результаты замеров расхода гелия при различных положениях размыкаемых частей токовводов между собой показали, что даже после непосредственного механического разрыва токовводов испарение гелия уменьшалось не скачком, а плавно и только при расстоянии размыкания ~8 мм расход снижался до ~0.12 л/ч. То есть даже после полного механического размыкания контакта продолжался интенсивный теплообмен между разорванными частями токовводов через газообразный гелий и передаваемая мощность при этом была сравнима с мощностью замкнутого контакта. Нужно отметить, что развести размыкаемые части токовводом между собой на расстояние большее, чем 8 мм и зафиксировать ещё больший эффект падения расхода гелия не представлялось возможным ввиду конструктивных ограничений данного узла. Однако наблюдаемое в ходе данного эксперимента значительное снижение расхода ещё раз подтвердило предположение о том, что, что именно по токовводам, находящимся в газе поступает в жидкий гелий та основная часть тепла, которая реально определяет величину испарения гелия в криостате.

Одним из следующих действий, направленных на уменьшение расхода гелия, стала замена обоих криокулеров Leybold с мощностью 0.5 Вт на второй 4К ступени на более мощные криокулеры Leybold, имеющие мощность 1 Вт. При этом никаких других изменений в конструкции криостата не производилось, так как оба типа криокулеров имели одинаковые присоединительные размеры и отличались только мощностью второй ступени. Однако, вопреки ожиданиям, расход гелия в криостате уменьшился очень незначительно, несмотря на удвоение общей холодильной мощности. Так, при замкнутых наружных токовводах расход упал всего до 0.35 л/ч с первоначальных 0.45 л/ч, а при разомкнутых токовводах с 0.2 л/ч до 0.1 л/ч. То есть расход снизился всего на 0.1 л/ч, что соответствует увеличению холодильной мощности, используемой на реконденсацию, всего на 0.07 Вт, хотя добавка составила величину 1 Вт. Таким образом, эффективность отбора мощности от криокулеров на реконденсацию составила всего ~7%. К сожалению, найти достаточно убедительное объяснение такому эффекту не удалось.

Поэтому, ввиду того, что точное описание и расчёт процессов теплообмена, происходящего между различными частями токовводов, находящихся в газовой среде с большими градиентами температур оказалось довольно затруднительным и любое дальнейшее продвижение в этом направлении потребовало бы длительных проверок, было принято радикальное решение вообще отказаться от традиционного способа размещения токовводов в охлаждающем газе и перенести их в охранный вакуум криостата. Однако при этом появлялась опасность, что в условиях вакуума охлаждение ВТСП токовводов потенциально ухудшалось, что могло привести к сверхпроводимости в нем и к сгоранию. Поэтому было очевидно, что потере основной проблемой станет обеспечить надёжное охлаждение ВТСП токовводов посредством тепловых контактов с хорошей теплопроводностью. В качестве выигрыша ожидалось, что в такой упрощённой ситуации, когда токоподводящие части будут размещены в вакууме и будут охлаждаться непосредственно головками криокулеров, удастся более точно учесть все процессы и рассчитать распределение температур и потоков мощности, по сравнению с ситуацией, когда токовводы находились в газе.

4.7. Перенос токовводов в защитный вакуум криостата

Первая попытка размещения токовводов В защитном вакууме была осуществлена на криостате сверхпроводящего дипольного поворотного магнита Superbend с полем 9 Тл, который был спроектирован и изготовлен ИЯФ СО РАН для накопителя BESSY-II в 2004 году [123, 125]. Предполагалось, что в дальнейшем будет изготовлено три таких поворотных магнита с большим уровнем поля для коренной модернизации магнитной структура накопителя с целью увеличения жёсткости спектра синхротронного излучения. Конструктивно Superbend О-образный магнит представляет собой сверхпроводящий с центральным отверстием для вакуумной камеры пучка, показанный на Рисунке 186, помещённый в криостат в форме барабана (см. Рисунок 187). Внешний вид этого криостата в сборе представлен на Рисунке 188.



Рисунок 186. Внешний вид сверхпроводящего магнита Superbend с полем 9 Тл.



Рисунок 187. Нижняя часть криостата Superbend в процессе сборки.



Рисунок 188. Внешний вид криостата 9 Тл магнита Superbend.

Для замыкания обратного магнитного потока на таком высоком уровне поля, как 9 Тл потребовалось использовать большой объем железа. Поэтому железное диаметра ~ 1 м, что создавало сложности ярмо этого магнита было увеличено до размещения такого магнита в тесном пространстве накопительного кольца. Чтобы не увеличивать чрезмерно размер криостата, который должен был содержать ещё и достаточный запас жидкого гелия для долговременной работы без дозаправки, было предложено минимизировать размер основного криостата, поместив весь запас жидкого гелия в отдельном накопительном криостате, расположив его сверху над основным. При этом все коммуникации в виде токоподводящих элементов и диагностических проводов подводились к магниту через верхний криостат. Было использовано два криокулера Leybold Coolpower 130, имеющих охлаждающую мощность 115 Вт на первой температурной ступени при 77 К и 15 Вт на второй ступени при 20К, которые охлаждали соответствующие экраны обоих криостатов.

Нагрузочные кривые данного устройства представлены на Рисунке 189. На Рисунке 190 показан внешний вид криокулер Leybold Coolpower 130 с мягкими адаптерами для соединения с 20 К и 60К экранами.





Рисунок 190. Криокулер Leybold Coolpower 130 с мягкими адаптерами для соединения с экранами.

Рисунок 189. Нагрузочные кривые криокулера Leybold Coolpower 130.

От использования криокулера с температурой ступени 4 К было решено отказаться. Оба криокулера были установлены на верхнем криостате и охлаждали экраны нижнего криостата, соединяясь с ним через узел стыковки. Использование дополнительного криостата было, конечно, вынужденной мерой, так как в этом случае не только появлялся сложный узел стыковки двух криостатов, нижняя и верхняя часть которого представлены на Рисунке 191 и Рисунке 192, но и увеличивалась в двое площадь холодных поверхностей, что неизбежно влекло за собой рост притоков тепла через излучение и дополнительные элементы подвески. Поэтому величина расхода гелия на данном криостате, конечно же, не была минимальной. Из Таблицы 4.5, где приведён расчётный тепловой баланс этого криостата, легко заметить, что приток тепла в гелий составлял ~0.65 Вт, что соответствовало расходу гелия на уровне ~0.9 л/ч. Однако, интерес здесь представляет не расход гелия сам по себе, а способ запитки магнита через

токовводы, размещённые в защитном вакууме криостата. Магнит запитывается током через три последовательно соединённых токовых элемента, как показано на Рисунке 193.



Рисунок 191. Узел стыковки нижнего основного криостата магнита Superbend с медными токовводами, выходящими из магнита.

Рисунок 192. Узел стыковки верхнего накопительного криостата магнита Superbend.



Рисунок 193. Конструкция верхнего накопительного криостата. Ввод тока осуществляется через цепочку из латунных и ВТСП токовводов, расположенных в защитном вакууме, и охлаждаемых криокулерами.

Источник притока тепла	Наружный	Внутренний	Гелиевый сосуд,
	тепловой	тепловой	Вт
	экран, Вт	экран, Вт	
Излучение	11	0.7	0.0001
Сильфоны вакуумной камеры	8	0.7	0.02
Система подвески	0.005	0.001	0.01
Токовводы без тока	15	4	0.14
Токовводы на поле 9 Тл	20	6	0.06
Измерительные провода	5	0	0.005
Всего	59.005	11.401	0.235
Холодильная мощность	230	30	0

Таблица 4.5. Баланс теплопритоков в верхнем криостате Superbend.

Снаружи ток вводится через латунные стержни длиной 540 мм с оптимизированным сечением 240 мм². На расстоянии ~2/3 длины от входа, по результатам оптимизации, представленных в виде графика распределения температур (см. Рисунок 194), на стержне был закреплён изолированный тепловой на наружный экран 60 К для снятия с каждого ввода теплопритока перехват ~ 7 Вт, образующегося величиной за счёт теплопроводности стержня и от джоулева нагрева протекающим током величиной ~300 А. Латунные стержни проходят через электрически изолированный узел вакуумного уплотнения в защитный вакуум верхнего криостата (см. Рисунок 195). На Рисунке 196 показан изолированный тепловой перехват на наружный экран 60 К.



Рисунок 194. Распределение температуры вдоль латунного токоввода с перехватом на экран 60 К при протекании по нему тока в 300 А.

В вакууме латунный токоввод соединяется с ВТСП токовводом, как показано на Рисунке 197 и постоянная температура места соединения поддерживается с помощью теплового электрически изолированного контакта с экраном 20К, отводящего мощность ~ 3 Вт с каждого соединения (см. Рисунок 198). Второй конец ВТСП токоввода подсоединён к медному токопроводу, герметично впаянному в проходной керамический изолятор, отделяющий защитный вакуум от гелиевого сосуда (см. Рисунок 199). Внешний вид герметичного керамического проходного изолятора со стороны гелиевого сосуда показан на Рисунке 200.



Латунный

фланца

195.

ИЗ

Рисунок

вакуума.

выходящий



Рисунок 196. Внешний вид латунного токоввод, токоввода с изолированными тепловыми защитного перехватами на экраны 60 К и 20 К.





Рисунок 197. ВТСП токоввод, соединяющий латунный токоввод с гелиевым сосудом через защитный вакуум.

Рисунок 198. Тепловой перехват с внутреннего конца латунного токоввода на экран 20 К.



Рисунок 199. Гибкая развязка ВТСП Рисунок 200. В токоввода с проходным керамическим изоляторов с м изолированным вводом.

Рисунок 200. Внешний вид проходных изоляторов с медным сердечником со стороны гелиевого сосуда.

Все электрические соединения и тепловые мосты изготовлены из мягкой меди, как показано на Рисунке 201 и на Рисунке 202, чтобы исключить механические нагрузки на хрупкие ВТСП токовводы от взаимных перемещений элементов криостата в процессе сборки охлаждения. В качестве электрических изоляторов использованы пластины из бериллиевой керамики толщиной 1 мм, имеющие в этом диапазоне температур теплопроводность ~400 Вт/м·К, сравнимую с медью.





Рисунок 202. Внешний вид ВТСП токовводов с гибкими токовыми адаптерами и датчиками температур.

Рисунок 201. Гибкая развязка узла теплового перехвата с 20 К экраном между латунным и ВТСП токовводом.

Со стороны гелиевого сосуда к вакуумному вводу подсоединён ещё один ВТСП токоввод, который, в свою очередь, уже соединяется с медным стержнем, в который впаяна шинка из ниобий – титанового сверхпроводника, выходящая непосредственно из обмоток магнита (см. Рисунок 203).

Теплоприток в гелий по теплопроводности каждого токоввода оценивается как 0.07 Вт. Это соответствует испарению жидкого гелия от пары токовводов ~ 0.2 л/час. При протекании тока 300 А дополнительно выделяется 0.03 Вт на каждом токовводе и, следовательно, должно испаряться гелия ~ 0.08 л/час. Общий теплоприток в гелиевый объем за счёт двух токовводов с током 300 А оценивается как 0.2 Вт, что соответствует 0.28 л/час.

В процессе испытаний был отдельно протестирован только верхний криостат с системой ввода тока в гелиевый сосуд через защитный вакуум и долговременный замер расхода гелия показал величину ~ 0.33 л/час, что согласовывалось с расчётным значением. Таким образом, был сделан вывод, что перенос токовводов в защитный вакуум показал работоспособность и надёжность такой конструкции, хотя приток тепла через токовводы и испарение гелия остались достаточно большими. Но главной целью в данном случае была собственно проверка новой концепции ввода тока в сверхпроводящий магнит через защитный вакуум криостата. Проведённая проверка показала хорошее совпадение измеренных распределений температур и потоков мощности с предсказанными значениями и, что самое главное, реальный расход жидкого гелия совпал, наконец, с расчётным значением. Поэтому была стратегия - проводить дальнейшее совершенствование криогенной предложена системы именно в этом направлении. И в качестве следующего логического шага напрашивалось осуществить перехватывание всего оставшегося потока тепла, все ещё поступающего в гелий от 20 К ступени криокулера через ВТСП токовводы, используя для этого уже криокулер не с 20 К, а с более холодной 4 К ступенью.

Во время испытания в течение 72 часов на максимальном поле 9 Тл и соответствующим током, близком к ~ 300 А, измерялись температуры на наружных концах ВТСП токовводов, перегрев которых является потенциально опасным и может привести к их сгоранию. Из графиков на Рисунке 204 видно, что уровень

температур стабильно находился на безопасном уровне, не превышающем ~60К, что характеризует надёжность и безопасность такого режима работы.





Рисунок 203. ВТСП токовводы, находящиеся внутри гелиевого сосуда и соединяющие обмотки магнита с наружными токовводами.



В результате первого опыта переноса токовводов в защитный вакуум возникла идея о том, следующим шагом в уменьшении расхода гелия должно быть усовершенствование криогенной системы вигглера таким образом, чтобы, не дожидаясь, как ранее, пока гелий испарится (и только затем уже предпринимать меры для его реконденсации), а, наоборот, организовать расположение охлаждающих контактов вдоль элементов ввода тока таким образом, чтобы последовательно перехватывать на охлаждающие головки криокулеров с температурами 60К, 20К и 4К вообще все тепло идущее в криостат снаружи и выделяемое при протекании тока, то есть в принципе не давать гелию испаряться.

4.8. Концепция криостата с перехватом всех каналов притока тепла в жидкий гелий

Новый в проектировании криостата состоял в идее подход полного перехвата всех каналов притока тепла, которые потенциально могли попадать в жидкий гелий, на соответствующие холодильные головки с температурами 60К, 20К и 4К посредством тепловодов необходимого сечения, расположенных в правильных местах. Таким образом, коренное отличие от предыдущего подхода, когда предпринимались попытки использовать как можно более эффективно холодильную мощность криокулеров для реконденсации уже испарённого гелия, состояло в том, что теперь предполагалось применять эту мощность уже для того, чтобы вообще предотвращать испарение жидкого гелия. При этом те элементы криостата, которые определяют основной приток тепла в гелий (токовводы), теперь размещались в защитном вакууме и потоки тепла по ним и распределение температур могли быть достаточно точно рассчитаны.

4.8.1. Блок токовводов

Для более эффективной стабилизации температуры всех элементов ввода тока было предложено осуществлять их охлаждение не через контакты с медными экранами, а конструктивно расположить все токоподводящие части непосредственно на корпусе самого криокулера и тем самым минимизировать длины теплосъёмных контактов и, следовательно, перепады температур. Таким образом, возникла идея создания блока токовводов в виде единого узла на основе криокулера с 4К ступенью, который размещался бы в защитном вакууме криостата. Общий вид первого такого блока токовводов представлен на Рисунке 205, а на Рисунке 206 показана его конструкция.

Ввод тока снаружи производится через комбинацию латунного и ВТСП токовводов, соединённых последовательно и имеющие теплоперехваты на 60К и 4К ступени. Далее ток вводился Nb-Ti сверхпроводником с диаметром 1 мм в гелиевый сосуд через керамический вакуумный изолятор. Конструктивно головка криокулера закреплена вертикально на фланце, являющемся съёмной частью наружного корпуса криостата. На этом же фланце размещены два герметичных электрически изолированных узла для ввода в вакуум двух латунных токовводов. Латунный токоввод представляет собой стержень (см. Рисунок 207), длина которого выбрана из соображения удобства компоновки, а сечение оптимизировано на ток 300А.



Рисунок 205. Внешний вид первого варианта блока токовводов.



Рисунок 207. Латунные токовводы с медными контактными наконечниками.

В каждой из двух токовых цепей в представленном варианте блока ввода тока использовался ВТСП токоввод с номинальным током 500 A, имеющим теплоприток в гелий 65 мВт, в соответствие с Таблицей 4.2. Таким образом, два таких блока токовводов, установленных на криостате, позволяли запитывать магнит суммарным током, приближающимся к ~1000 A, что давало общий теплоприток всего ~0.26 Вт при общей мощности двух используемых криокулеров 2 Вт. Впервые новый токовводный узел был использован и испытан на многополюсном вигглере, изготовленным и установленным ИЯФ СО РАН на накопителе CLS (Canadian Light Source) в Канаде [**128**, **129 130 131**, **134**]. На Рисунке 208 представлен общий вид этого криостата вместе с новыми токовводными узлами.



Рисунок 208. Внешний вид криостата вигглера CLS с блоками токовводов во время тестирования.

Испытания реального криостата показали, что расход гелия снизился до < 0.03 л/ч. Распределение температур в характерных точках криостата представлено на Рисунке 209, из которого можно заметить, что температуры верхних концов ВТСП токовводов не превышали безопасных 64К, нагрев наружного экрана составлял ~ 35 К, а внутреннего ~ 10К. Можно также заметить, что, судя по температурам на 4К ступенях криокулеров, тепловая нагрузка ни них составляла 0.6 Вт для 3.6 К на первом криокулере и 0.8 Вт при 3.9 К на втором криокулере, соответственно. Таким образом, суммарная отводимая мощность составила 1.4 Вт при общей мощности обоих криокулеров 2 Вт. Разница температур на обоих криокулерах можно объяснить несимметричным распределением протекающих по ним токов.



Рисунок 209. Снимок с экрана программы управления вигглером с характерными температурами в основных точках криостата.

При этом в течение всего периода испытаний объем гелиевого сосуда был полностью отсечён от наружной атмосферы вентилем и не удалось обнаружить никакой зависимости расхода гелия от величины максимального магнитного поля и, соответственно от величины токов, протекающих по токовводам. Более того, в процессе потери сверхпроводимости магнита, давление в гелиевом сосуде подрастало до 0.2 бар (как показано на Рисунке 210), что не превышало давления открывания аварийного клапана (~0.3 бар), и, таким образом, гелий не выбрасывался в атмосферу даже в этом случае. Конечно, этому способствовала малый запас энергии этого сверхпроводящего 63-полюсного магнита с полем всего 2 Тл, которая составляла не более ~15 кДж. На Рисунке 211 представлено поведение температур на протяжении периода испытаний при различном уровне магнитного поля.



Рисунок 210. Поведение давления в криостате CLS при потере сверхпроводимости. Гелиевый объем отсечён от наружной атмосферы. Максимальное давление не превышает 0.2 бар.



Рисунок 211. Поведение температур в характерных точках криостата 2 Тл 63полюсного вигглера CLS в процессе тестирования.

Однако в процессе одного из переходов в нормальное состояние произошло обгорание сверхпроводящего Nb-Ti проводника, идущего через изолятор в гелиевый сосуд. Было сделано предположение, что охлаждение сверхпроводника, находящегося в вакууме, недостаточно. Поэтому блок ввода токов претерпел коренную модернизацию. Не изменяя основную концепцию, были полностью переработаны узлы, от которых зависит надёжность работы этого блока. Окончательный вариант блока токовводов представлен на Рисунке 212.



Рисунок 212. Модернизированный вариант блока токовводов.

В модернизированной конструкции сверхпроводящий провод был заменён на многожильную сверхпроводящую шинку, увеличена площадь охлаждения контактов через сапфировую пластинку толщиной 1 мм, значительно увеличено сечение и уменьшена длина медных тепловодов. К нижнему концу латунного стержня был припаян с помощью вакуумно-диффузионной сварки гибкий переходник большого сечения, набранный из медных фольг толщиной 0.2 мм. Этот медный переходник, в свою очередь, припаян к верхнему концу ВТСП токоввода индиево-оловянным

припоем, имеющим температуру плавления ~118C⁰. Низкотемпературный припой был применён, для того, чтобы избежать расплавления внутренней пайка ВТСП токовводов, которая осуществлена с помощью индиевого припоя с температурой $157C^{0}$. Термостабилизация места соединения латунного и ВТСП токовводов производится тепловым контактом с медной плитой, имеющей толщину 20 мм и RRR=100, которая закреплена через индиевую прокладку непосредственно к первой 60К ступени криокулера. Давление контакта осуществляется резьбовым прижимом с резьбой М8 через шлифованные диски из сапфира диаметром 14 мм и толщиной 1 смазанные криогенной смазкой APIEZON N. Выбор именно сапфира MM, определялся хорошей механической прочностью и экстремально высокой теплопроводностью ~ 5000 Вт/м·К, что в рабочем диапазоне температур 40 – 70 К в несколько раз превышает теплопроводность бескислородной меди. К нижнему концу ВТСП токоввода припаяны гибкие сверхпроводящие шинки. Место пайки, по аналогии с верхним концом, также имеет хороший электрически изолированный тепловой контакт через сапфир с нижней медной плитой, которая закреплена через индиевую прокладку на второй 4К ступени криокулера. Температура на всей длине сверхпроводящей шинки, которая подводится затем через узел керамического изолятора непосредственно в гелиевый сосуд к магниту, поддерживается на уровне 4 К, благодаря достаточно большому сечению меди, находящейся в шинке и не требует дополнительного охлаждения, кроме теплового контакта с 4К ступенью. Все электрические контакты имеют только паяные соединения для минимизации электрического сопротивления и тепла, выделяющегося за счёт протекания тока. Все электрические контакты выдерживают без пробоя напряжение не менее 1000 В.

Выбор материалов для изготовления деталей данного узла, их сечений и давлений прижимов определялся получением максимально возможной теплопроводности и минимального градиента температур между охлаждаемым местом и головкой криокулера для перехвата всей тепловой мощности, идущей в жидкий гелий.

Электрический ток вводился в сверхпроводящий магнит, находящийся в гелиевом сосуде, через узел керамических изоляторов, размещённых на корпусе сосуда, в которые впаивалась целиком переходная сверхпроводящая шинка, которая

затем соединялась пайкой свинцово-оловянным припоем с аналогичной шинкой, идущей от магнита внутри сосуда. Вакуумное уплотнение узла изоляторов осуществлялось прокладкой из индиевой проволоки диаметром 1 мм. Все пайки между сверхпроводящими шинками производились на длине перекрытия не менее 150 мм для минимизации тепловыделений от протекания тока. Тем не менее, очевидно, что именно остаточные омические сопротивления несверхпроводящих паяных контактов являются в данном случае основным источниками нагрева при протекании тока.

Таким образом, новая концепция, впервые применённая в конструировании криостата, оказалось успешной, что позволило впервые достигнуть расхода жидкого гелия, близкого к нулевому значению. Причём, расчётные значения теплопритоков, определяющих расход гелия, хорошо совпали с реальными значениями.

4.8.2. Уменьшение расхода гелия за счёт удвоения числа токовводов

При проектировании магнитной структуры сверхпроводящих вигглеров с малым периодом возникает необходимость уменьшать продольные геометрические размеры сверхпроводящих обмоток. Но для того, чтобы скомпенсировать связанное с этим уменьшение числа витков, приходится автоматически увеличивать токи в обмотке для достижения такого же высокого уровня поля (очевидно, что для повышения тока необходимо использовать и другие сверхпроводящие провода с более высоким токонесущими характеристиками). Например, для достижения требуемого уровня поля 4 Тл при величине периода 48 мм и магнитном зазоре 14 мм на 27-полюсном вигглере, предназначенном для исследовательского канала BMIT (Bio Medical and Terapy), на накопителе CLS [136], величина необходимого рабочего тока в результате оптимизации размера обмоток составила уже 900А, в отличие, например, от 500А, которых было бы достаточно для получения такого же поля в вигглере с большим периодом. Поэтому, учитывая то, что джоулево тепло, выделяемое на несверхпроводящих спаях, зависит от тока как $\propto I^2$, было предложено усовершенствовать схему ввода тока в криостат путём удвоения числа токовводов, что позволило вдвое снизить ту долю тепла, которая определяется нагревом на контактах. На Рисунке 213 и Рисунке 214 представлены упрощённые схемы запитки обмоток магнита с обычной схемой и вариантом с удвоенным количеством токовводов.



Рисунок 213. Схема запитки обмоток с использованием 4 токовводов.



Рисунок 214. Схема запитки обмоток с использованием 8 токовводов.

Можно считать, что тепло, выделяющееся в верхних частях цепи ввода тока на латунных и ВТСП частях, последовательно перехватывается на соответствующие ступени криокулера. Однако между нижним концом ВТСП токоввода (охлаждаемым ступенью с температурой 4К) и магнитом имеется несверхпроводящий спай, часть тепла с которого оттягивается на холодильную головку, но остальная часть тепла идёт в жидкий гелий. Пусть каждый несверхпроводящий паянный контакт, имеет некоторой сопротивление R. Тогда при вводе тока величиной I (на Рисунке 213 этот ток равен 400 A), мощность P_1 , выделяющаяся на каждом из этих контактов можно вычислить, как:

$$P_1 = RI^2 \tag{4.14}$$

Однако, если поделить каждый токоввод с током 400 A, на 2 раздельных токоввода с половинным током, величиной по 200 A в каждом, как показано на Рисунке 214, и, считать, что сопротивление контактов R, зависящее только от площади контакта и способа пайки подводящих проводов, в обоих случаях меняется несущественно, то мощность P_2 , выделяемая на двух токовводах с током 200 A, будет равна:

$$P_{2} = 2 \cdot \left[R \left(\frac{I}{2} \right)^{2} \right] = \frac{1}{2} \cdot RI^{2} = \frac{1}{2} \cdot P_{1}$$
(4.15)

Таким образом, величина мощности, выделяющейся на второй 4К ступени криокулера от двух токовводов с половинным током, будет вдвое меньше, чем от одного токоввода с полным током. Следовательно, благодаря квадратичной зависимости мощности от тока, появляется возможность вводить в криостат вдвое больший ток, не увеличивая при этом долю мощности от протекающего тока, которая приводит к испарению жидкого гелия.

В данном случае были сделаны следующие допущения:

 Сопротивление несверхпроводящих контактов в обеих схемах запитки меняется незначительно, так как площадь паяного контакта при одинаковом сечении шинки, подводящей ток в магнит, практически, не меняется;

2) Судя по данным производителя ВТСП токовводов, приведённым в Таблице 4.2, теплоприток от пары стандартных ВТСП токовводов с номинальным током 250А равен 57 мВт, что составляет примерно половину от притока тепла по токовводам с номинальным током 500А, равного 130 мВт. Следовательно, так как приток тепла по ВТСП токовводам разного номинала практически пропорционален номинальному паспортному току, то при использовании удвоенного числа токовводов дополнительного теплопритока в гелий не появляется.

В качестве чисто экономического недостатка такой схемы можно признать то, что появляется два дополнительных дорогостоящих ВТСП токоввода и два дополнительных источника питания. Однако, можно показать, что стоимость одной дополнительной пары ВТСП токовводов, примерно равна стоимости 150 – 200 литров жидкого гелия и экономический эффект от сокращения расхода гелия при долговременной эксплуатации будет заведомо преобладать над стоимостью токовводов.

Вообще говоря, можно использовать такой же подход при необходимости ввести ещё больший ток без дополнительных теплопритоков, разделяя его по нескольким токовводам. Очевидно, что в этом случае общий приток мощности P_N по N токовводам с током I/N будет равен $P_N = {P_1/N}$, где P_1 – мощность,

выделяемая на одном токовводе с протекающим по нему полному току *I*. Таким образом, общая мощность уменьшится в N раз. Экономически это может быть вполне оправдано, так как количество испарённого гелия будет входить в стоимость долговременной эксплуатации вставного устройства гораздо больше, чем стоимость дополнительных токовводов.

Внешний вид модернизированного блока с использованием четырёх токовводов, позволяющего запитывать сверхпроводящий магнит, находящийся в жидком гелии, суммарным током 500 A (2 пары токовводов по 250 A каждая), изображён на Рисунке 215. На Рисунке 216 и Рисунке 217 показан внешний вид 60 К и 4 К узлов охлаждения контактов, соответственно. Использование двух таких блоков токовводов на одном криостате позволяет вводить в магнит суммарный ток ~ 1000A.



Рисунок 215. Внешний вид узла ввода тока на 500 А.





Рисунок 216. Узел охлаждения контактов Рисунок 217. Узел охлаждения контактов 60 К. 4К.

4.9. Исследование эффективности теплообменника с позолоченной поверхностью

Как уже упоминалось в Главе 4.4, для увеличения эффективности реконденсации гелия были опробованы несколько медных теплообменников различной конструкции, ни один из которых не позволил реально уменьшить расход гелия (по крайне мере, на фоне расхода в ~0.6 л/ч, определяемого теплопритоками по токовводам). Однако, после проведённых принципиальных усовершенствований конструкции криостата и, в том числе, переноса токовводов в вакуум и интеграцию их в единый блок токовводов, был достигнут, наконец, тепловой баланс с расходом гелия, близким к нулю. Поэтому было выдвинуто предположение, что на таком низком уровне расхода можно было бы уже выделять эффекты, связанные с реконденсацией гелия с большей чувствительностью. В связи с этим была исследована возможность получения реконденсации гелия путём увеличения эффективности теплообмена с 4 К ступенью криокулера с помощью усовершенствования теплообменника.

В качестве нового варианта теплообменника было предложено использовать массивный полированный медный стержень, покрытый гальванически слоем золота толщиной ~9 мкм. Первая попытка использования такого позолоченного теплообменника была предпринята на 2 Тл вигглере для накопителя CLS (Канада) [134], для чего в конструкции центральной горловины криостата было заранее подготовлено посадочное место (заглушаемое при обычной работе вакуумным фланцем) для временной установки третьего криокулера с мощностью 1 Вт на второй 4 К ступени с закреплённым на ней теплообменником новой конструкции. Позолоченный теплообменник, внешний вид которого представлен на Рисунке 218, вставлялся вместе с криокулером непосредственно в объем гелиевого сосуда в центральной горловине криостата, как показано на Рисунке 219.





Рисунок 218. Внешний вид позолоченного теплообменника на 4К ступени криокулера.

Рисунок 219. Конструкция узла ввода теплообменника в центральную горловину криостата.

В результате подключения третьего криокулера давление в гелиевом сосуде, отсечённом от окружающей атмосферы вентилем, начало падать и стабилизировалось на уровне - 0.1 бар ниже атмосферного. При этом в криостат вводился в долговременном режиме максимальный ток величиной ~800 A, соответствующий рабочему полю в сверхпроводящем магните 2Tл.

245

Таким образом, впервые на криостате с холодной массой ~ 1000 кг и сверхпроводящим магнитом, погруженным в отсечённый от наружной атмосферы сосуд с жидким гелием и запитываемым током ~800 А, был не только получен нулевой расход гелия, но и было продемонстрировано пониженное, относительно наружной атмосферы, давление в гелиевом сосуде. Такой результат не только продемонстрировал возможность криостата подобной конструкции работать без расхода жидкого гелия, но и давал возможность увеличить уровень магнитного поля в магните. Благодаря уменьшению давления в сосуде и соответствующему понижению температуры кипения жидкого гелия, характеристики сверхпроводящего провода смещались в сторону больших критических токов. Это позволяло достигнуть больших токов в обмотках и, соответственно, увеличить уровень магнитного поля. Так на Рисунке 220 представлены нагрузочные кривые

критического тока в сверхпроводящем проводе диаметром 0.92 мм, имеющего критический ток 700 А в магнитном поле 7 Тл, из которого можно заключить, что при понижении температуры жидкого гелия на 0.1 К критический ток возрастает на ~ 30 А.



Рисунок 220. Нагрузочные кривые сверхпроводящего провода для разных температур.

Обратим внимание на то, что условия данного эксперимента были далеко не оптимальные:

1) Использовался не самый мощный криокулер с мощностью 1 Вт на 4 К ступени;

2) Весь корпус криокулера целиком находился в газообразном гелии, что могло способствовать образованию конвективного теплообмена между ступенями через газ.

Несмотря на это, в криостате было получено пониженное относительно атмосферного давление. Поэтому следующим шагом стало нахождение наилучшего технического решения для максимального использования мощности криокулеров и соответствующего понижения давления в гелиевом сосуде. Отметим, что решение этой задачи давало бы ещё и чисто экономический выигрыш в продлении срока работы криокулеров без проведения обслуживания, так как при пониженной температуре ступеней вся система криокулера, включая компрессоры, работала бы с меньшей нагрузкой.

Поэтому в следующей конструкции криостата была предложена схема, при которой в составе блока токовводов использовался криокулер с повышенной с мощностью 1.5 Вт на 4 К ступени и, кроме охлаждения токовводов, часть холодильной мощности второй 4 К ступени была направлена непосредственно на позолоченного теплообменника. реконденсацию гелия через охлаждение Конструктивно теплообменник (Рисунок 221) был оформлен в виде отдельного узла, на котором одновременно были размещены как изоляторы для ввода тока, так и сам позолоченный теплообменник (Рисунок 222). Теплообменник был впаян во фланец высокотемпературным припоем таким образом, чтобы нижняя часть его находилась в гелиевом сосуде, а верхняя в защитном вакууме криостата и охлаждалась от 4 К ступени с помощью гибкого медного тепловода большого сечения, как показано на Рисунке 223.





Узел

позолоченного

222.

Рисунок 221. Внешний вид теплообменника, совмещённый с позолоченных теплообменников. изоляторами ввода тока.

Рисунок

Такая компактная конструкция позволяла использовать уже существующее посадочное место на гелиевом сосуде, первоначально предназначенное только для изоляторов ввода тока, для размещения нового узла, что давало удобную возможность легко модернизировать старые криостаты с ненулевым расходом гелия простой заменой нового узла. Присоединение фланца к гелиевому сосуду производится с использованием криогенного вакуумного уплотнения типа Helicoflex. На Рисунке 224 и Рисунке 225 показан процесс замены старого узла на новый.



Рисунок 223. Конструкция блока токовводов с позолоченным гелиевым теплообменником.

Использование такой конструкции было впервые осуществлено на 119полюсном 2.1 Тл вигглере, созданном ИЯФ СО РАН в 2010 году для накопителя ALBA-CELLS (Испания) [139, 140, 141, 142]. В результате давление в гелиевом сосуде понизилось до 0.5 бар относительно наружной атмосферы и температура в гелиевом сосуде опустилась, соответственно, до 3.5 К. В итоге уровень магнитного поля вырос с 2.15 Тл до 2.28Тл, что увеличило надёжность работы криостата и значительно расширило спектральный диапазон генерируемых фотонов для проведения экспериментов на синхротронном излучении. На Рисунке Рисунок 226 представлен график поведения давления в гелиевом сосуде вигглера ALBA при работе на максимальном поле, откуда видно, что оно монотонно падает до 0.5 бар, независимо от уровня поля в магните.





Рисунок 224. Фланец изоляторов ввода тока.

Рисунок 225. Фланец узла теплообменника с изоляторами ввода тока.



Рисунок 226. Поведение давления в гелиевом сосуде 119-полюсного 2.1 Тл вигглера ALBA при работе на максимальном поле.

4.10. Устранение влияния вибраций криокулеров на электронный пучок

На фоне неоспоримых преимуществ, которые даёт применение криокулеров, использующих цикл Гиффорда – Макмагона для поддержания криогенных температур на сверхпроводящих вставных устройствах, существует, по крайней мере, два недостатка, которые необходимо учитывать при конструировании криостатов. Эти особенности, определяемые принципом работы криокулеров, состоят в следующем:

1. Температурные осцилляции на второй ступени, которые могут достигать ± 0.2 К на фоне ~ 4 К, в зависимости от режима работы криокулера. Такие периодические изменения температуры могут, в лучшем случае, создавать неудобство при измерении точного уровня температур, а в худшем, приводить к периодическому превышению критической температуры сверхпроводника и, соответственно, к потере сверхпроводимости. Однако, реальная ситуация сильно упрощается тем, что сам охлаждаемый магнит, имеющий массу несколько сотен килограммов, несколько сглаживает эти осцилляции температуры и непосредственно на самой сверхпроводящей обмотке амплитуда колебаний температур будут намного меньше. Типичное поведение температуры на головке второй ступени представлено на Рисунке 227.

2. Гораздо большие проблемы могут создать механические вибрации, которые возникают при движении поршня и могут передаваться от корпуса криокулера на криостат и далее на тело магнита. Вибрации магнита, в зависимости от их амплитуды и частоты, могут приводить к заметному воздействию на электронный пучок накопителя и мешать проведению экспериментов. Поэтому при установке на накопитель таких криогенных устройств особые требования предъявляются к уровню вибраций, создаваемых криокулерами на холодной массе магнита, которые обычно не должны превышать долей микрона. На Рисунке 228 представлен типичный спектр механических осцилляций криокулера Sumitomo SRDK- 415, из которого видно, что амплитуда горизонтальных вибраций не превышает 0.7 мкм, а величина вертикальных достигает 9 мкм.



Рисунок 227. Типичные пульсации Рисунок 228. Частотный спектр температур на 4К ступени механических вибраций 4К ступени криокулера Sumitomo SRDK-415, криокулера Sumitomo **SRDK-415** достигающие ±0.2 К. горизонтальном И вертикальном направлениях.

В

Принимая BO внимание то, что В конфигурации магнитного поля многополюсного вигглера присутствует только вертикальная составляющая поля и предполагая, что поле однородно в поперечном направлении, можно считать, что наибольшее воздействие на пучок будет оказывать колебания магнита именно в вертикальном направлении. На Рисунке 229 условно представлено распределение поля в вигглере и орбита пучка.



Рисунок 229. Распределение поля в многополюсном вигглере и орбита пучка.

251

Легко заметить, что хотя в медианной плоскости, благодаря симметрии, присутствует только вертикальная составляющая поля B_z , но при отклонениях по вертикали появляется и продольная компонента поля B_s . В этом случае величину продольного поля можно выразить как:

$$B_s = \frac{\partial B_z}{\partial s} \cdot z \tag{4.16}$$

и в сопутствующей системе координат, следующей по синусоидальной траектории пучка и повёрнутой на угол x' относительно системы координат вигглера, компонента поля B_s будет иметь еще и проекцию на ось x, равную:

$$B_x = B_s \cdot x' = \frac{\partial B_z}{\partial s} \cdot z \cdot x' \tag{4.17}$$

Наличие же горизонтальной поперечной компоненты поля B_x приводит к появлению градиента поля и, соответственно, к фокусировке пучка в вертикальном направлении z и сдвигу вертикальных бетатронных частот. Таким образом, колебания холодной массы магнита по вертикали, возбуждаемые вибрациями криокулеров, могут заметно ухудшать стабильность электронного пучка накопителя и требуют принятия специальных мер, направленных на подавление этих вибраций. Рассмотрим особенности использования криокулеров, связанные с механическими вибрациями, при использовании для охлаждения сверхпроводящих вставных устройств.

Магнит, находящийся в герметичном гелиевом сосуде, непосредственно подвешен к цилиндрическому корпусу криостата, на котором жёстко закреплён криокулер, точные характеристики которого, как источника вибраций неизвестны. Корпус криостата имеет сложную форму с различными рёбрами жёсткости, патрубками и другими элементами, влияющие на его характеристики как элемента передачи вибраций через подвески на тело магнита. Причём места установки криокулеров на корпусе и точки подвеса магнита разнесены между собой. Поэтому провести точный расчёт передачи вибраций на магнит является трудноразрешимой задачей по причине большого количества неизвестных параметров. Но можно для простоты, рассмотрев колебания магнита, подвешенного на подвесках с учётом
трения, определить собственную частоту колебаний такой системы ω₀, имеющей только одну степень свободы в вертикальном направлении. Сначала рассмотрим случай, когда источник гармонической вынуждающей внешней силы $F = F_0 \cos \omega t$ (где F_0 – амплитуда силы) воздействует с частотой ω непосредственно на тело магнита и оценим возможность передачи вибраций, сравнив собственную частоту системы с частотой источника вибраций (криокулера). Считая для простоты, что внешняя сила приложена непосредственно к магниту, представим такую систему, схематично изображённую на Рисунок 230, как груз массой *т*[кг], связанный с неподвижным корпусом криостата пружиной с коэффициентом жёсткости $k \left| \frac{H}{M} \right|$ (подвески магнита) и демпфирующим элементом с коэффициентом демпфирования $d\left[\frac{H}{M_{l_{\alpha}}}\right]$. Демпфирующими элементами являются, например, мягкие медные теплопроводящие элементы, связывающие магнит с головками криокулера, которые можно интерпретировать как элементы вязкого трения, при котором сила трения пропорциональна скорости.



Рисунок 230. Виброзащитная схема подвески магнита к неподвижному корпусу криостата на упругом амортизаторе из пружины с жёсткостью k и демпфера вязкого трения d. F(t) – внешняя вынуждающая сила.

В таком случае, исходя из равновесия действующих на систему сил, можно записать дифференциальное уравнение колебаний такой системы:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t, \tag{4.18}$$

где x – вибросмещение, отсчитываемое от точки равновесия, \dot{x} – виброскорость, а \ddot{x} - виброускорение. При этом первый член уравнения $m\ddot{x}$ отвечает за собственную инертность системы, а два других $d\dot{x}$ и kx за приложенное к магниту внешнее воздействие в виде вязкого трения и реакции упругой связи, соответственно. Сумма этих сил в виде:

$$R = kx + d\dot{x} \tag{4.19}$$

является динамическим усилием, передаваемым магниту через эти элементы связи.

Обозначим
$$\frac{k}{m} = \omega_0^2$$
 и $\frac{d}{m} = 2n$ и перепишем уравнение (3) следующим образом:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t$$
(4.20)

Решение этого линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами может быть представлено в виде [64]:

$$x = A\cos(\omega t - \varphi), \tag{4.21}$$

где амплитуда колебаний:

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}} , \qquad (4.22)$$

а сдвиг фаз колебаний массы m и внешней силы F(t):

$$tg\varphi = \frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad , \tag{4.23}$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – собственная частота системы, а $n = \frac{d}{2m}$ – коэффициент затухания.

Оценить степень виброизоляции магнита от внешних вибраций со стороны криокулера можно сопоставив амплитуду силы R_0 , передаваемой непосредственно на магнит через так называемый упругий амортизатор, состоящий из пружины и демпфера с амплитудным значением внешней силы возбуждающей F_0 . Отношение амплитуды силы R_0 к амплитуде внешней силы F_0 называется коэффициентом виброизоляции и обозначается как $K_R = \frac{R_0}{F_0}$. Вообще говоря, под коэффициентом виброизоляции принято понимать отношение амплитуд

виброперемещения, виброскорости, виброускорения защищаемого объекта или действующей на него силы к соответствующему параметру источника вибрации и чем меньше коэффициент виброизоляции, тем эффективнее виброизоляция. Подставив в формулу (4.19) соответствующие выражения для смещения *x* и скорости *x*, получим:

$$R = kx + d\dot{x} = A[k\cos(\omega t - \varphi) - d\omega\sin(\omega t - \varphi) = R_0\cos(\omega t - \varphi_1)], \qquad (4.24)$$
где

$$R_{0} = A\sqrt{k^{2} + (d\omega)^{2}} = F_{0} \frac{\sqrt{1 + \frac{4n^{2}\omega^{2}}{\omega_{0}^{4}}}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^{2}}{\omega_{0}^{2}}\right)^{2} + \frac{4n^{2}\omega^{2}}{\omega_{0}^{4}}}}$$
(4.25)

амплитудное значение силы, развиваемой в упругом амортизаторе, и сдвиг фазы:

$$\varphi_1 = \varphi - \operatorname{arctg} \frac{2n\omega}{\omega_0^2} \tag{4.26}$$

Используя понятие относительного коэффициента затухания $D = \frac{n}{\omega_0} = \frac{d}{2m\omega_0}$, можно записать выражение для коэффициента виброизоляции:

$$K_{R} = \frac{R_{0}}{F_{0}} = \sqrt{\frac{1 + 4D^{2} \left(\frac{\omega}{\omega_{0}}\right)^{2}}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{0}}\right)^{2}\right)^{2} + 4D^{2} \left(\frac{\omega}{\omega_{0}}\right)^{2}}}$$
(4.27)

Теперь рассмотрим случай, когда внешняя вынуждающая сила приложена не непосредственно к магниту, а магнит подвешен к корпусу криостата, который колеблется вдоль вертикальной координаты *s* под действием вибраций, исходящих от криокулера и теперь уже оказывает воздействие на магнит через пружину и демпфер. Эта схема изображена на Рисунке 231. В этом случае уравнение движения магнита будет иметь вид:

$$m\ddot{x} + d\dot{x} + kx = d\dot{s} + ks \tag{4.28}$$

или

$$m\ddot{x} + d(\dot{x} - \dot{s}) + k(x - s) = 0 \tag{4.29}$$

Можно показать, что в этом случае, если подставить выражение для смещения криостата $s = s_0 \cos \omega t$ и смещение магнита $x = A \cos(\omega t - \varphi)$ в уравнение (4.29), получим, что амплитуда колебания магнита будет равна:

$$A = s_0 \sqrt{\frac{k^2 + d^2 \omega^2}{(k - m\omega^2)^2 + d^2 \omega^2}},$$
(4.30)

а коэффициент виброизоляции, которым в данном случае вычислим как отношение ускорения магнита к ускорению криостата, будет равен:

$$K_R = \frac{\ddot{x}_{max}}{\ddot{s}_{max}} = \frac{A}{s_0} = \sqrt{\frac{k^2 + d^2 \omega^2}{(k - m\omega^2)^2 + d^2 \omega^2}},$$
(4.31)

что полностью совпадает с выражением (4.27) и, следовательно, эта формула подходит и для анализа схемы подвески магнита, изображённой на Рисунке 231.



Рисунок 231. Виброзащитная схема подвески магнита к корпусу криостата, колеблющегося вдоль координаты *s*.

На Рисунке 232 представлены графики зависимости коэффициента виброизоляции K_R , который показывает какая доля динамической возмущающей силы передаётся через виброизоляцию в систему, от отношения частоты возмущающей внешней силы ω к собственной частоте системы $\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$, где $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ для различных значений коэффициента затухания $D = \frac{n}{\omega_0}$.

Из анализа этих графиков можно сделать следующие выводы:

1. При $\frac{f}{f_0} \ll 1$, когда частота вынуждающей силы намного меньше собственной частоты системы вынуждающая сила действует как статическая и целиком передаётся системе, которая двигается вместе с этой силой. Преимуществом в этом случае, является, по крайней мере, отсутствие усиления амплитуды колебаний (коэффициент виброизоляции $K_R = 1$). Эта область называется предрезонансной;

2. При $0.4 < \frac{f}{f_0} < 1$ происходит усиление передаваемой вибрации;



Рисунок 232. Графики зависимости коэффициента виброизоляции K_R от соотношения частоты внешней возбуждающей силы и собственной частоте системы $\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$ для различных коэффициентов затухания *D*.

3. При $\frac{f}{f_0} \sim 1$ наступает резонанс и амплитуда колебаний, при отсутствии затухания, неограниченно увеличивается. В этом случае ($D \rightarrow 0$) выражение (4.27) для вычисления K_R будет выглядеть как:

$$K_R = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1}$$
(4.32)

4. При $\frac{f}{f_0} = \sqrt{2}$ коэффициента виброизоляции $K_R = 1$ и вибрация проходит целиком (без усиления или ослабления амплитуды);

5. При $\sqrt{2} < \frac{f}{f_0} < 4$ наступает зона эффективной виброизоляции, когда система оказывает все большее инерционное сопротивление, и передача вибрации через виброизоляцию уменьшается;

6. При $\frac{f}{f_0} > 5$ коэффициента виброизоляции $K_R \to 0$ и передача вибраций полностью прекращается;

7. Можно также заметить, что наличие виброизоляции без затухания при приближении к резонансу не только не даёт эффекта, но даже приносит вред, так как в этом случае $K_R > 1$;

8. Чем ниже собственная частота виброизолируемой системы по сравнению с частотой вынуждающих колебаний, тем выше эффективность виброизоляции;

Применительно к конкретной конструкции для наших криостатов, можно проигнорировать такие элементы, как горизонтальные кевларовые растяжки, а также такие достаточно гибкие элементы как медные тепловоды отводящие тепло от магнита к головкам криокулеров, а также сильфоны центральной горловины и вакуумной камеры пучка. Точный расчёт коэффициентов затухания этих элементов невозможен, да и не требуется, так как эти элементы, благодаря своей мягкости, будут играть роль виброизоляторов и хорошо поглощать энергию вибраций, не передавая её на холодную массу магнита. Так на Рисунке 233, Рисунке 234 и Рисунке 235, показаны для примера несколько элементов теплопередачи, используемых в криостате, которые были изготовлены из мягкой отожжённой медной фольги толщиной 0.2 мм, места тепловых контактов на которых были сварены до монолитного состояния с помощью вакуумно-диффузионной сварки. На Рисунке 236 изображён другой вариант мягкого теплопроводящего элемента, изготовленного из медных канатиков.





Рисунок 234. Мягкий медный тепловод для контакта головки криокулера 60К и медного экрана.

Рисунок 233. Мягкий медный тепловод для соединения головки криокулера 20 К и вакуумной камеры.







Рисунок 236. Мягкий медный адаптер для соединения криокулера и экрана.

Поэтому можно упрощённо рассматривать в качестве основного канала, пропускающего вибрации к холодной массе магнита, систему подвесок, состоящую из четырёх вертикальных кевларовых лент, проходящих через отверстия в экранах и жёстко закреплённые к наружному корпусу криостата (см. Рисунке 237). В этом случае можно считать, что собственная частота колебаний такой системы определяется только массой магнита и жёсткостью натянутых кевларовых подвесок.



Рисунок 237. Гелиевый сосуд с магнитом, подвешенный к наружному вакуумному корпусу на кевларовых тягах.

Холодная масса магнита m, подвешенного на кевларовых лентах длиной L к наружному корпусу криостата, растягивает эти подвески силой тяжести F = mg (где $g = 9.8 \text{ M}/_{c^2}$) на величину ΔL , согласно Закону Гука:

$$F = -k \cdot \Delta L, \tag{4.33}$$

где *k* - коэффициент упругости растянутой подвески. Для определения собственной частоты колебаний холодной массы магнита на подвесках необходимо знать коэффициент упругости растянутой подвески *k*, который определяется геометрией подвески и модулем упругости, являющегося характеристикой материала (модуля Юнга) *E*, и выражается как:

$$k = E \cdot \frac{s}{L},\tag{4.34}$$

где S – сечение кевларовой ленты. Величина сечения кевларовой ленты выбиралась из соображения прочности на разрыв с коэффициентом запаса, равным 2. При этом предполагалось, что наихудшим вариантом перераспределения нагрузки, равной ~800 кг между четырьмя подвесками будет диагональное вывешивание магнита на двух подвесках по ~400 кг на каждой и в этом случае две оставшиеся подвески останутся недогруженными. После экспериментальной проверки прочности на разрыв одной нити плотностью 58.8 текс (что означает вес 58.8 г на км нити), которая оказалась равной ~90 H, были намотаны ленты, содержавшие по 150 витков в каждой. Величина сечения такой кевларовой ленты составила ~6 мм². На Рисунке 238 и Рисунке 239 показан внешний вид таких кевларовых лент.



Рисунок 238. Внешний вид вертикальной кевларовой тяги с локальным тепловым перехватом.



Рисунок 239. Внешний вид вертикальных кевларовых тяг собранных на узлах подвеса.

Точно определить модуль упругости *E* для кевлара – материала из которого изготовлены подвески, довольно затруднительно, так как его величина сильно различается для различных марок кевлара и конкретной технологии его производства. Вообще говоря, под термином "кевлар", являющимся названием торговой марки фирмы DuPont (США), подразумевается целое семейство арамидных волокон, различающихся производителями и технологиями изготовления. Основные физико-механические характеристики таких материалов, взятые из работы [65], приведены, в Таблице 4.6.

	CBM	Русар	Кевлар 129
Модуль упругости Е, ГПа	125-140	140-180	75
Прочность нити на разрыв, ГПа	3.8	4.5	3.3
Удлинение при разрыве, %	2,5-2.0	2.6	3.6
Плотность, г/см ³	1.42 - 1.45	1.45	1.44

Таблица 4.6. Основные характеристики различных марок арамидных волокон (кевлара):

Из приведённой таблицы можно заметить, что модуль Юнга может варьироваться в широком диапазоне от 75 ГПа, как, например, у алюминия, до 180 ГПа, приближаясь к свойствам стали. Более того, судя по исследованиям, приведённым в работе [66], в которой изучались механические характеристики ориентированных полимеров, к которым принадлежат такие разновидности "Русар", "Кевлар-49" арамидных волокон, как И "CBM" (Синтетический Высокопрочный Материал), было обнаружено аномальное увеличение модуля упругости арамидных волокон при больших деформациях. Причём, отмечено, что такой эффект проявляется как на комплексной нити, состоящей из сотен параллельных волокон, так и на моноволокне и после разгрузки модуль и деформация возвращаются к исходным значениям и, следовательно, увеличение модуля Юнга не было связано с неупругой деформацией. В частности, указывается, что в волокнах СВМ модуль упругости повышается от начальных 110 до 215 ГПа при относительной деформации ~3%. Последняя величина модуля упругости близка к теоретическому пределу продольной жёсткости СВМ при абсолютном нуле температуры, которая составляет 210—250 ГПа.

Таким образом, в связи с тем, что величина такой важной для определения собственной частоты характеристики, как модуль Юнга, может варьироваться в 2.5 \div 3 раза, в зависимости от различных условий, точное определение собственной частоты колебаний магнита не представляется возможным. А учитывая то, что собственная частота системы f_0 с массой m зависит от коэффициента упругости натянутой подвески k как $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$, неопределённость в вычислении

собственной частоты может достигать $\sqrt{3} \approx 1.73$ раза. Так, считая, что нагрузка 800 кг распределена равномерно по 200 кг между четырьмя подвесками, собственная f_0 может меняться от 16 Гц при коэффициенте упругости k, равном, частота согласно формуле (4.34), $k = (100 \cdot 10^9 \left[\frac{H}{M^2}\right] \times 6 \cdot 10^{-6} [M^2]) / 3 \cdot 10^{-1} [M] = 2 \cdot 10^6 \left[\frac{H}{M}\right]$ для модуля упругости кевлара $E = 100 \cdot 10^9 \left[\frac{H}{M^2}\right]$ до 25 Гц если $k = (250 \cdot 10^{-5})^{-5}$ $10^9 \left[\frac{H}{M^2}\right] \ge 6 \cdot 10^{-6} [M^2] \left(3 \cdot 10^{-1} [M] = 5 \cdot 10^6 \left[\frac{H}{M}\right]$ при $E = 250 \cdot 10^9 \left[\frac{H}{M^2}\right]$. Ho, c другой стороны, хотя такая погрешность довольно существенна, для нашей конкретной системы она не является слишком важной, ввиду того, что в обоих этих крайних случаях система все равно находится ещё далеко в предрезонансной зоне (см. график на Рисунке 232). Так, при большем значении модуля упругости отношение частоты вынуждающей силы от кулера, равной 1.8 Гц, к собственной частоте системы будет составлять $\frac{f}{f_0} = \frac{1.8 \, \Gamma_{\rm H}}{25 \, \Gamma_{\rm H}} = 0.072$, а при меньшей жёсткости $\frac{f}{f_0} = \frac{1.8 \, \Gamma_{\rm H}}{16 \, \Gamma_{\rm H}} = 0.11$. Физически это означает, что при любых реальных значениях жёсткости кевларовых подвесок коэффициент передачи (виброизоляции) будет близок к $K_R \sim 1$ и магнит будет целиком следовать за перемещением, вызванным вынуждающей силой. Выгодой от такой подвески является надёжное удаление от резонанса, но при этом колебания от кулеров будут передаваться на магнит через корпус криостата, хотя и без усиления амплитуды. Такую подвеску можно трактовать как жёсткую сцепку между корпусом криостата и магнитом. Можно заметить, что для полного подавления передачи вибраций следовало бы сместить собственную частоту, так чтобы перейти в зарезонансный режим, при котором отношение частот должно быть по крайне мере, $\frac{f}{f_0} \ge \sqrt{2}$ (см. Рисунок 232). Однако осуществить это, практически невозможно, так как для этого потребуется либо понизить собственную частоту до величины порядка ~1 Гц, увеличив массу магнита, либо уменьшив жёсткость подвесок (за счёт их сечения) в десятки раз. Таким образом, в рассматриваемой конструкции опасность передачи вибраций на магнит сохранялась, но провести точный расчёт доли энергии вибраций, переданной на магнит не представлялось возможным ввиду неопределённости

многих параметров этой системы. Следовательно, реальное воздействие вибраций от криокулеров на холодную массу магнита и, соответственно, на электронный пучок могло быть исследовано только экспериментально.

И, например, при проведении диагностики влияния вибраций со стороны 45-полюсного вигглера с полем 3.5 Тл на электронный пучок накопителя ELETTRA, как это описано в работе [67], было обнаружено, что в спектре вертикальных колебаний пучка, представленных на Рисунке 240, присутствует вертикальное смещение орбиты на 3.7 мкм на частоте ~1.8 Гц, которая была близка к основной частоте вибраций используемых криокулеров Leybold Coolpower 4.2 GM. Причём, при выключении криокулеров вибрации пучка полностью исчезали. Это доказывало, что источником вертикальных вибраций являются именно криокулеры, охлаждающие вигглер.



Рисунок 240. Спектр вертикальных колебаний пучка с энергией 2 ГэВ на накопителе ELETTRA от 45-полюсного вигглера с полем 3.5 Тл. Максимальное смещение орбиты составляет 3.7 мкм на частоте ~1.8 Гц (основная частота вибраций криокулеров Leybold Coolpower 4.2 GM).

Таким образом, во время этого эксперимента было выяснено, что довольно значительная часть энергии вибраций криокулера через корпус криостата и подвески передавалась магниту. Было также замечено, что в процессе геодезической сборке криостата было довольно сложно обеспечить магнита при выставки равномерную натяжку всех четырёх вертикальных подвесок, что можно было объяснить большой жёсткостью и нерастяжимостью кевлара. Из этого было выдвинуто предположение, что в такой неустойчивой системе могла возникнуть и дополнительная степень свободы колебаний – раскачивание магнита вокруг одной из диагональных осей, благодаря его диагональному вывешиванию на двух наиболее нагруженных тягах. Очевидно, что подвешивание магнита на трёх подвесках было бы лишено такого недостатка, однако такая схема подвески приводила к некоторым техническим неудобствам.

эффекта было Для устранения ЭТОГО предложено использовать дополнительные элементы в виде пружинных шайб, расположенных между корпусом криостата и точками крепления подвесок, которые с одной стороны, играли бы роль дополнительной виброразвязки, а с другой – перераспределяли бы равномерно нагрузку на все четыре тяги. Критерием при выборе такой шайбы являлось нахождение её в зоне упругости при равномерном распределении веса магнита на все четыре подвески. Таким образом, в качестве пружинного элемента были пружинные шайбы, выбраны стандартные имеюшие параметры, представленные на Рисунке 241, которые при равномерном распределении нагрузки по 200 кг на каждую тягу имели просадку $s = 0.5 h_0$ (где h_0 – полный ход пружины до полного сжатия), которая и обеспечивала постоянное подпружинивание подвесок и устраняла лишнюю степень свободы системы в виде раскачивания магнита вокруг своей диагонали. При этом такая пружина, не сильно отличаясь коэффициентом упругости от жёсткости самих подвесок и не меняя собственную частоту системы, имела гораздо больший рабочий ход в области упругости. На Рисунке 242 представлен чертёж с расположением такого пружинного элемента в месте подвеса на криостате.







Рисунок 241. Пружинная шайба DIN 2093, использованная для подавления вибраций.

Рисунок 242. Место установки пружинной шайбы на узле подвеса для подавления вибраций.

В результате использования такой усовершенствованной схемы подвески перераспределяющей магнита, равномерно нагрузку, удалось, практически полностью устранить передачу вибраций от криокулера на электронный пучок и вибрации в пучке больше не обнаруживались. В качестве дополнительного примера можно привести криостат со схожей схемой подвеса магнита, который был сконструирован ИЯФ СО РАН для ускорителя APS (США) [68], на котором так же было проведено измерение механических вибраций от криокулеров фирмы Sumitimo SRDK-415 в различных точках криостата и окружающих его элементах. В результате измерений, проведённых в диапазоне 2÷100 Гц в районе вакуумной камеры (точка 1 на Рисунке 243) было выяснено, что интегральная спектральная вибраций возрастала с 0.38 плотность мощности МКМ с выключенными криокулерами до 0.65 мкм после их включения. При этом на частоте 8.375 Гц амплитуда вибраций возрастала почти в 10 раз (с 0.06 мкм до 0.57 мкм) после включения криокулеров. Однако при этом было отмечено, что каких либо вибраций нестабильностей от работы криокулеров непосредственно на или других электронном пучке обнаружить не удалось.



Рисунок 243. Расположение точек измерения вибраций на криостате APS (США), сконструированном в ИЯФ СО РАН. Вибрации на частоте 8.375 Гц в районе вакуумной камеры (точка 1) возрастали с 0.06 мкм до 0.57 мкм при включении криокулеров. При этом вибраций в пучке не обнаружено.

Отсюда можно сделать заключение, что применённая усовершенствованная схема подвеса магнита в криостате позволила полностью устранить передачу вибраций от криокулеров на электронный пучок, что и было продемонстрировано на нескольких вигглерах с различными марками криокулеров, установленных на различных действующих накопителях.

4.11. Криостат вигглера с нулевым расходом жидкого гелия и особенности его работы в режиме пониженного давления

Использование нового подхода к проектированию криогенных систем сверхпроводящих вставных устройств, предназначенных для работы на накопителях заряженных частиц в качестве генераторов синхротронного излучения, позволило создать криостат нового поколения. В результате исследований, направленных на уменьшение расхода жидкого гелия была реализована новая концепция конструирования криостатов для сверхпроводящих магнитов на основе криокулеров, позволившая повысить эффективность использования мощности криокулеров до уровня, не только снижающего расход жидкого гелия до нуля, но и создающего пониженное относительно атмосферного давление в криогенном сосуде с соответствующим понижением температуры кипения жидкого гелия вплоть до ~3К. Новый подход заключается в использовании холодильных ступеней криокулеров не только для реконденсации уже испарённого гелия, но и для полного предотвращения его испарения путём последовательного перехвата всех каналов притока тепла на ступени криокулеров с соответствующими температурами. На основе этого принципа был создан криостат, способный долговременно (в течение работать нескольких лет) автономно на ускорителях заряженных частиц в условиях ограниченного доступа без потребления жидкого гелия, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку, создаваемую электронным пучком и током величиной около 1000 А, вводимым для запитки магнита. Функциональная схема такого криостата представлена на Рисунке 244.



Рисунок 244. Функциональная схема криостата сверхпроводящего многополюсного вигглера на основе криокулеров с нулевым расходом гелия.

Модель собранного криостата изображена на Рисунке 245. На Рисунке 246 и Рисунке 247 представлены продольное и поперечное сечение трёхмерной модели криостата (магнит для простоты не показан).



Рисунок 245. Криостат в сборе.



Рисунок 246. Продольное сечение криостата.



Рисунок 247. Поперечное сечение криостата.

Сверхпроводящий магнит заключён в горизонтально расположенный нержавеющий гелиевый сосуд цилиндрической формы (см. Рисунок 248), покрытый 10 слоями криогенной суперизоляции и окружённый двумя медными экранами с температурами 20 К (см. Рисунок 249) и 60К (показан на Рисунке 250) для защиты от теплового излучения. Наружный 60 К экран также покрыт 30 слоями суперизоляции. При таком способе экранирования приток тепла через тепловой излучение в гелий не превышает 0.01 мВт.

270



Рисунок 248. Гелиевые сосуд.



Рисунок 249 Экран 20 К.



Рисунок 250 Экран 60 К.

Гелиевый сосуд подвешен к наружному корпусу криостата с помощью четырёх вертикальных подвесок и четырёх горизонтальных растяжек из кевлара. Использование кевлара, имеющего очень низкую теплопроводность и высокую механическую прочность, позволило радикально уменьшить сечение подвесок и уменьшить приток тепла в гелий через систему подвесок до 0.01 Вт. Подвески проходят сквозь тепловые экраны к регулировочным узлам, позволяющим выставлять положение гелиевого сосуда снаружи, не нарушая вакуум криостата, как показано на Рисунке 251.



Рисунок 251. Система подвесок.

Связь гелиевого сосуда с наружной атмосферой производится через центральную горловину криостата, изображённую на Рисунке 252, через которую также осуществляется заливка жидкого и сброс газообразного гелия и вывод диагностических проводов. Общий расчётный теплоприток в гелий по сильфонам центральной горловины не превышает 0.06 Вт.



Рисунок 252. Центральная горловина с верхним фланцем.

Для охлаждения элементов криостата используется система медных тепловодов, которые перехватывают потоки тепла во всех критических точках криостата и отводят его на головки четырёх криокулеров фирмы SUMITOMO - двух SRDK-415D с температурами 4К и 60К и двух SRDK-408S2 с температурами 20К и 60К, характеристики которых были представлены в Таблице 4.1 [**69**]. При этом все четыре ступени с температурой 60К и общей мощностью ~ 180 Вт используются для охлаждения наружного теплового экрана от внешнего излучения и перехвата тепла от вакуумной камеры накопителя. Криокулеры SRDK-415D являются основой двух узлов ввода тока (см. Рисунок 253), состоящих из наружных латунных токовводов, соединённых с внутренними высокотемпературными сверхпроводящими ВТСП

токовводами. Ступени криокулеров SRDK-415D с температурой 60 К используются также для перехвата тепла, поступающего снаружи по латунным токовводам, и джоулева тепла, выделяющегося в этих токовводах при протекании суммарного тока ~ 300 А в каждом. При этом две ступени с температурой 4 К и мощностью по 1.5 Вт каждая перехватывают тепло от ВТСП токовводов, а так же охлаждают жидкий гелий в сосуде с помощью специального позолоченного медного теплообменника. Расчётный приток тепла в гелий по всем токовводам не превышает 0.3 Вт без тока, а включение тока добавляет теплоприток не более 0.3 Вт. На Рисунке 254 представлено типичное поведение температур на верхних концах ВТСП токовводов, которое характеризует запас надёжности этого узла, откуда видно, что эти температуры не превышают абсолютно безопасных ~48 К при стационарной работе с максимальным током и опускаются до ~38 К при выключении тока.



Рисунок 253. Блок ввода тока с 4 К тепловодом для охлаждения позолоченного теплообменника.



Рисунок 254. Типичное поведение температур на верхних концах ВТСП токовводов.

В межполюсной зазор сверхпроводящего магнита вставлена вакуумная камера из нержавеющей стали, являющаяся одновременно стенкой гелиевого сосуда и камерой для пролёта пучка, а также промежуточная медная камера (лайнер). Лайнер для защиты объёма с жидким гелием от нагрева, как пучком используется синхротронного излучения, так и токами, наведёнными электронным пучком накопителя. Ступени криокулеров SRDK-408S2 с температурой 20К используются для перехвата тепла с лайнера. Для обеспечения гарантированного механического зазора между лайнером и сосудом с жидким гелием по всей длине вигглера были применены дистанцирующие прокладки, изготовленные ИЗ материала с чрезвычайно низкой теплопроводностью (ULTEM 2100) для уменьшения притока тепла в жидкий гелий. Расчётный теплоприток в гелий через механические поддержки медного лайнера не превышает 0.2 Вт. Сечение вакуумной камеры и места стыковки вигглера с камерой с накопителя представлено на Рисунке 255. Более подробно про особенности использования медного лайнера будет сказано в Главе 5.



Рисунок 255. Сечение стыковки вакуумной камеры с накопителем.

Что касается притока тепла через остаточный газ, то в режиме молекулярного течения, когда длина свободного пробега молекул оказывается больше расстояния между ограничивающими поверхностями, молекулы пролетают от тёплой стенки с температурой T_2 к холодной с температурой T_1 без межмолекулярных соударений. В этом случае теплопроводность газа становится функцией числа молекул, то есть давления p и удельный приток тепла, обусловленный молекулами остаточного газа можно оценить по формуле:

$$q[BT/M^2] = \alpha_0 \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{8\pi\mu T}} (T_2 - T_1)p, \qquad (4.35)$$

где $R = 8.314[Дж/(моль \cdot K)]$ – универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса газа, $\gamma = C_p/C_v$ – показатель адиабаты, T – температура в месте измерения давления (комнатная), $\alpha_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + (\frac{1}{\alpha_2} - 1) \cdot \frac{S_1}{S_2}}$ – общий коэффициент аккомодации, характеризующий неполноту обмена энергией между молекулами и поверхностью при определённой температуре и зависящий от природы газа и поверхности (при этом α_1 – коэффициент для выпуклой, а α_2 – для вогнутой поверхности), S_1 и S_2 – площади выпуклого и вогнутого тела. Так, например для нержавеющей стали

276

наружного корпуса с комнатной температурой $\alpha_2 = 0.07$, а для меди теплозащитного экрана при 40 К $\alpha_1 = 0.075$. Если подставить соответствующие значения γ и μ , то для воздуха выражение (4.35) можно записать как:

 $q[B_{\rm T}/{\rm M}^2] = 160\alpha_0(T_2 - T_1)p \tag{4.36}$

Практика показывает, что при давлении ниже 10⁻⁶ мбар теплопроводностью остаточного газа можно пренебречь. В описываемом криостате защитный вакуум откачивается до остаточного давления, не превышающего 10⁻⁷ – 10⁻⁸ мбар. К тому же холодные поверхности криостата работают, как вакуумные криогенные насосы, в результате чего, теплоприток в гелий через остаточный газ можно считать пренебрежимо малым. На Рисунке 256 представлено типичное поведение давления остаточного газа в защитном вакууме криостата в течение длительной работы. Заметим, что локальный рост давления на данном графике связан выходом магнита из сверхпроводящего состояния и небольшим нагревом холодных поверхностей криостата изнутри гелиевого сосуда испарённым газом. В результате часть молекул остаточного газа, которая вымерзла на криогенных поверхностях, перешла в пространство защитного вакуума. Далее эти молекулы вновь осели на криогенные поверхности либо скачались насосом.



Рисунок 256. График давления остаточного газа в защитном вакууме криостата. Рост давления связан выходом магнита из сверхпроводящего состояния.

Защитный вакуум отделён от сверхвысоковакуумной камеры пучка сильфонными узлами. Общий расчётный теплоприток в гелий по этим сильфонам не превышает 0.04 Вт. Стыковка с высоковакуумной камерой накопителя производится с помощью выходного фланца, изображённого на Рисунке 257. Для плавного перехода между лайнером и камерой накопителя используются радиочастотные адаптеры со скользящими пружинными контактами, которые одновременно используются и для компенсации теплового сжатия лайнера при охлаждении. При этом неподвижная часть адаптера закреплена со стороны накопителя, а второй контакт, соединяющийся с лайнером, скользит по наружному контакту при изменении размера лайнера. Внешний вид высокочастотных адаптеров представлен на Рисунке 258.



Рисунок 257. Выход вакуумной камеры.

Рисунок 258. Внешний вид высокочастотных адаптеров для плавного соединения лайнера с камерой накопителя.

Общий расчётный баланс теплопритоков в криостат представлен в Таблице 4.7, из которой можно заключить, что холодильная мощность криокулеров на всех ступенях заведомо превышает соответствующие притоки тепла, что не только значительно повышает надёжность криогенной системы, особенно при работе в условиях накопителя, но и повышает ресурс работы криокулеров. Можно отметить также, что общая холодильная мощность 4 К ступеней превышает тепловыделения в ~3 раза и избыточная мощность идёт, соответственно, на переохлаждение гелиевого сосуда с магнитом внутри и понижение давления в сосуде. Это даёт возможность не только увеличить надёжность работы магнита, но и повысить уровень магнитного поля за счёт улучшения токовых характеристик сверхпроводника.

	Наружный	Внутренний	Гелиевый сосуд
	экран (60 К),	экран (20 К),	(4 К), Вт
	Вт	Вт	
Тепловое излучение	8	0.05	0.0002
Центральная горловина	2.5	0.3	0.06
Сильфоны вакуумной камеры	5.3	0.25	0.04
Система подвесок	0.5	0.1	0.01
Токовводы (теплопроводность)	50	0	0.3
Нагрев токовводов током	50	0	0.3
Измерительные провода	5	0.1	0.01
Лайнер	10	10	0.2
Общий приток	131.3	10.8	0.92
Охлаждающая мощность	180	15	3
криокулеров	(при 50 К)	(при 20 К)	(при 4.2 К)

Таблица 4.7. Баланс теплопритоков в криостат с нулевым расходом гелия.

Рассмотрим подробнее особенности работы криостата с нулевым расходом гелия и пониженным относительно атмосферного давлением в гелиевом сосуде:

1. Процесс охлаждения криостата с холодной массой ~ 1000 кг от комнатной температуры до рабочего состояния с температурой 4 К занимает не более 2 дней (включая предварительное охлаждение жидким азотом), как можно заметить из Рисунка 259. При этом скорость охлаждения значительно увеличивается, благодаря опережающему охлаждению теплозащитных экранов и других элементов криостата криокулерами, имеющими значительный запас охлаждающей мощности. Схематичное расположение датчиков температур в различных точках криостата изображено на Рисунке 260.





280

Рисунок 259. График поведения температур в процессе захолаживания криостата от комнатной температуры до 4 К.

Рисунок 260. Расстановка датчиков температур криостата (копия экрана программы управления).

2. Характерное поведение давления в гелиевом сосуде при стационарной работе в случае отсечки его от наружной атмосферы, представлено на Рисунке 261, откуда видно, что давление монотонно падает и за 1 сутки стабилизируется на уровне ~0.25 бар абсолютного давления, что соответствует -0.75 бар относительно наружной атмосферы. На Рисунке 262 показана типичная карта температур на одном из криостатов при работе в таком режиме на максимальном поле, равном 2.5 Тл. Интересно отметить, что температуры 4К ступеней стабилизировались на уровне 3.3 К, что, судя по нагрузочным кривым криокулера SRDK-415 (см. Рисунок 137), соответствует общему притоку мощности в гелиевый сосуд ~ 1 Вт, несмотря на то, что магнит запитывается в этот момент в стационарном режиме полным током ~1000А и в накопителе циркулирует полный ток 200 мА. Заметим, что это значение хорошо согласуется с расчётной величиной суммарных теплопритоков в гелий 0.91 Вт (см. Таблицу 4.7). Некоторое превышение реальной выделяемой мощности может быть связано, например, с разбросом величины сопротивлений несверхпроводящих паяных контактов между Nb-Ti шинками резерфордовского типа, идущими со стороны магнита и вводящими ток в криостат. При необходимости проводимость этих контактов можно было бы существенно уменьшить путём холодной сварки части проводников, входящих в состав обоих соединяемых шинок. Однако это имеет

чисто технические неудобства при сборке и разборке криостата, тем более, что большой запас холодильной мощности криокулеров заведомо покрывает эти погрешности. Заметим, что наиболее важные температуры на верхних концах ВТСП токовводов не превышает ~50 К при максимальных токах в стационарном режиме. В таком режиме температура сверхпроводящего магнита опускается до уровня ~3.5 К, что соответствует давлению гелия в сосуде ~0.5 бар.





3. Переохлаждение гелия позволило получить в магните с номинальным расчётным полем 2.5 Тл магнитное поле 2.65 Тл с переходом в нормальное состояние, а затем выставить максимальный уровень поля 2.85 Тл даже без потери сверхпроводимости, как это легко заметить из графика тренировки магнитного поля этого вигглера, который был представлен на Рисунке 103. Важно также обратить внимание на уровень температур на медном лайнере, защищающем гелиевый сосуд от притоков тепла со стороны пучка накопителя, который стабилизировался на уровне ~8.6 К, что соответствует (судя по нагрузочным кривым криокулера SRDK-408S2 на Рисунке 137) полному отсутствию притока мощности.



Рисунок 262. Типичное поведение основных параметров сверхпроводящего вигглера с нулевым расходом гелия (копия экрана программы управления).

4. Для проверки устойчивости криогенной системы был проведён эксперимент, во время которого магнит в стационарном состоянии с максимальным магнитным полем 2.6 Тл преднамеренно нагревался до потери сверхпроводимости с помощью специальных нагревателей, используемых обычно для отогрева магнита до комнатных температур. Результаты этого эксперимента представлены на Рисунке 263 и Рисунке 264, откуда видно, что температура магнита перед этим искусственным переходом в нормальное состояние возросла в процессе нагрева с ~3 К до ~4 К и, увеличившись после потери сверхпроводимости до пиковых ~7 К, установилась на уровне 4.3 К, после разравнивания по всему магниту после чего начала охлаждаться. Отметим, что абсолютная точность измерения температур в данном случае не совсем корректна, так как термодатчики на магните не были специально теплоизолированы от жидкого гелия и могли занижать реальную температуру магнита.



Рисунок 263. Уровень поля в магните в процессе искусственного выхода из состояния сверхпроводимости. Рисунок 264. Поведение температуры магнита при потере сверхпроводимости, спровоцированной нагревом.

что разрежение в гелиевом сосуде играет 5. Важно также, отметить положительную роль, так как позволяет в процессе перехода в нормальное состояние сохранить весь объем гелия внутри криостата без потерь в атмосферу. Так из Рисунка 265 видно, что давление, поднявшееся в момент потери сверхпроводимости с 0.4 бар до уровня 0.8 бар, сразу начинает падать, благодаря включению в работу 4К ступеней криокулеров, так как, благодаря повышению температуры на них с 3.5 К до 4.2 К (см. Рисунок 266), холодильная мощность выросла с 1.1 Вт до 1.5 Вт (судя по диаграммам на Рисунке 137). Более того, запас холодильной мощности позволяет конденсировать газообразный гелий при непрерывной подаче его в гелиевый сосуд при нормальном давлении и, таким образом, наращивать уровень гелия в криостате.





Рисунок 265. Поведение давления в гелиевом сосуде во время потери сверхпроводимости (сосуд отсечён от наружной атмосферы).

Рисунок 266. Поведение температуры на вторых 4 К ступенях криокулеров SRDK-415D во время потери сверхпроводимости. Интересно отметить, что уровнемер гелия показывает падение уровня жидкости в замкнутом гелиевом сосуде при переохлаждении с 3.2 К до 2.9 К на ~2-3%, как показано на Рисунке 267, что соответствует реальному уменьшению объёма за счёт увеличения плотности жидкого гелия на такую же величину, судя по графику на Рисунке 268.





Рисунок 267. Поведение температур на 4 К ступенях криокулеров и соответствующее падение уровня жидкого гелия.

Рисунок 268. Зависимость плотности жидкого гелия от температуры. По вертикальной оси – отношение плотности жидкости к плотности газа при нормальных условиях.

6. Особенностью реализации системы управления сверхпроводящими вигтлерами, создаваемыми в ИЯФ СО РАН, является гибкость, а так же возможность адаптации и интегрирования в большинство распространённых в мире на сегодняшний день систем управления ускорительными комплексами. Это является необходимым условием, ввиду того, что вигглеры могут устанавливаться на источники синхротронного излучения всех поколений, при создании которых за основу систем управления брался текущий на то время уровень развития автоматизации ускорительными комплексами. Конечно, управление накопителями подвергалось со временем постоянной модернизации, но единого подхода на сегодняшний день ещё не выработано. Концепция системы управления вигглерами основана на автономном контроллере, который обрабатывает диагностические сигналы (датчики температур, давления, блокировок), а также осуществляет управление токами источников, запитывающих сверхпроводящий магнит, контролирует режим работы компрессоров криокулеров и т.д. Обмен данными с внешней системой осуществляется также через контроллер вигглера. Подробности работы системы управления сверхпроводящими вигглерами подробно изложены в работах [70, 71 101, 113].

Следует отметить, что, наряду с очевидными преимуществами работы криостата в режиме пониженного давления, было выявлено, как минимум, два фактора, на которые следует обратить внимание при эксплуатации такого криостата: 1. Если не предусмотреть специальных мер, то появляется опасность натекания наружной атмосферы BO внутренний объем криостата через возможные негерметичные соединения. Это может привести к образованию ледяной пробки в горловине, связывающей гелиевый сосуд с наружной атмосферой, что является аварийной ситуацией и грозит неограниченным ростом давления в криостате при испарении гелия. Во избежание такой ситуации в центральную горловину криостата была введена дополнительная трубка, соединяющая внутренний объем гелиевого сосуда непосредственно с наружной атмосферой, на которой был установлена аварийная разрывная мембрана.

2. Неожиданный эффект был обнаружен при заливке жидкого гелия в криостат 15-полюсного 7.5 Тл вигглера для LSU-CAMD с накопленной энергией 850 кДж, находящийся под пониженным давлением и включённым при этом на максимальный уровень поля. Такое, казалось бы, обычное сочетание факторов привело к аварийной потери сверхпроводимости, сопровождающейся разрушением ВТСП токовводов и расплавлению вакуумных изоляторов для вводов тока в гелиевый сосуд. Оказалось, что тёплый газообразный гелий, порция которого обычно попадает в гелиевый сосуд через трассу заливки гелия в начальный период заливки, заполнив разреженный объем гелиевого сосуда с пониженным давлением 0.3 бар, нагрела через теплоперехваты медные экраны, охлаждающие, в том числе и ВТСП токовводы. В результате, ВТСП токовводы, нагревшись выше критической температуры, вышли ИЗ сверхпроводящего состояния И расплавились.

Возникнувшее при этом размыкание токовой цепи с большой индуктивностью привело к потере сверхпроводимости в магните, к электрическому пробою и загоранию электрической дуги в вакууме, которая разрушила герметичный токовый ввод, разделяющий гелиевый сосуд с защитным вакуумом криостата. Это, в свою очередь, привело к выбросу гелия в защитный вакуум криостата и разрушению мембраны, защищающей вакуумный корпус. Это неожиданное стечение обстоятельств внесло свои поправки в правила эксплуатации таких криостатов, по которым, заливку жидкого гелия можно производить только после вывода тока из сверхпроводящего магнита.

Однако, несмотря не некоторые особенности, связанные с работой криостата с пониженным давлением, те преимущества, которые (помимо очевидного отсутствия расхода гелия), даёт такая конструкция в виде уникальной возможности повысить уровень поля и ресурс криокулеров, имеют гораздо большее значение и в настоящее время такие криостаты успешно работают во многих центрах синхротронного излучения.

Выводы к Главе 4:

1. Предложена и реализована на практике новая концепция криостата для вставных устройств, основанная на последовательном перехвате всех теплопритоков в сосуд с жидким гелием на соответствующие ступени криокулеров с температурами 60 К, 20 К и 4 К, что, совместно с применением позолоченного медного теплообменника, позволило не только получить нулевой расход жидкого гелия, но и, переохладив гелий до температуры ~3К, достигнуть пониженного относительно атмосферного давления в гелиевом сосуде, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку со стороны электронного пучка и тока величиной около 1000 А, вводимого для запитки магнита. Криостат такого типа может длительное время (более 1 года) автономно работать в условиях ограниченного доступа внутри биозащиты ускорителя без дополнительного обслуживания;

2. Снижение температуры кипения жидкого гелия до ~3 К позволило не только повысить надёжность работы криостата, но и увеличить уровень магнитного поля, благодаря смещению токовых характеристик сверхпроводящего провода;

3. Предложена и реализована на практике концепция блока токовводов на основе оптимизированных латунных и ВТСП токовводов, расположенных в защитном вакууме и охлаждаемых криокулером с температурой ступеней 60 К и 4 К, что позволило вводить в сверхпроводящий магнит суммарный ток ~ 1000 А, сохраняя при этом нулевой расход жидкого гелия;

4. Предложена и реализована концепция удвоения числа токовводов, позволяющая вдвое снизить приток тепла в гелий, определяемый нагревом несверхпроводящих контактов от протекания тока;

5. Использование вместо экрана, охлаждаемого жидким азотом, двух защитных экранов, охлаждаемых ступенями криокулеров с температурами 60 К и 20 К, совместно с многослойной суперизоляцией, снизило приток тепла через излучение на наружный 60 К экран до 8 Вт, внутренний 20 К экран до 50 мВт и на гелиевый сосуд до ~0.2 мВт, что позволило, учитывая избыточную мощность криокулеров, исключить из рассмотрения приток тепла через излучение в тепловом балансе криостата;

Применение кевлара позволило снизить приток тепла по подвескам до уровня ~10 мВт и исключить из рассмотрения этот канал теплопритока в жидкий гелий из общего теплового баланса криостата;

7. Исследование возможности работы многополюсного сверхпроводящего магнита в режиме замкнутого тока с использованием трансформаторов подкачки тока показало, что наличие взаимной индуктивности между цепями запитки током приводит к перераспределению токов между обмотками, что ограничивает применение такого режима.

8. Были исследованы особенности работы и даны рекомендации для использования криостата с нулевым расходом жидкого гелия в режиме пониженного относительно атмосферного давления.

Глава 5

Использование лайнера для защиты от нагрева пучком

Важной особенностью криостатов, предназначенных ДЛЯ вставных устройств, работающих на накопителях заряженных частиц, является неизбежный нагрев вакуумной камеры в результате различных механизмов взаимодействия внутренней поверхности камеры, как с электромагнитным полем циркулирующего электронного пучка, так и с синхротронным излучением от поворотных магнитов, расположенных выше по ходу пучка. Поэтому при проектировании такого криостата, помимо учёта обычных факторов, влияющих на расход жидкого гелия таких как тепловое излучение, теплопроводность по элементам конструкции и молекулам остаточного газа, особое место занимает учёт тепловыделений, связанных с воздействием электронного пучка. Очевидно, что именно эта часть криостата потенциально является наиболее проблемным и напряжённым местом, так как, с одной стороны, межполюсной зазор магнита необходимо минимизировать для увеличения магнитного поля, а с другой - увеличивать для уменьшения влияния электронного пучка, что всегда требует компромиссного решения. Кроме того, помимо нагрева, взаимодействие пучка с вакуумной камерой вставного устройства может вызывать неустойчивости различных типов, приводящие к потерям энергии пучка, изменениям формы сгустков и сдвигам бетатронных частот, что накладывает особо жёсткие требования к выбору правильной конструкции камеры. Рассмотрим основные источники выделения тепла со стороны электронного пучка, которые необходимо учитывать при проектировании вакуумной камеры вставного устройства.

5.1. Источники нагрева лайнера

5.1.1. Нагрев камеры синхротронным излучением

Первым и очевидным фактором нагрева вакуумной камеры является синхротронное излучение, генерируемое как предыдущими магнитами, так и самим
вставным устройством. На накопителях – источниках синхротронного излучения сверхпроводящие вставные устройства устанавливаются обычно В центре прямолинейного промежутка. Поворотный магнит, стоящий выше по ходу пучка, излучает СИ в широкий горизонтальный угол по касательной к участку траектории. Таким образом, часть этого излучения может попадать и на участки камеры вставного устройства, расположенные снаружи траектории пучка. Мощность, 1 излучаемая поворотным магнитом В мрад горизонтального угла И проинтегрированная по вертикальным углам, даётся выражением [72]:

$$P_{SR} = \frac{eI_0}{10^3 6\pi\varepsilon_0} \frac{\gamma^4}{R} \left[\text{Bt/mpad} \right] , \qquad (5.1)$$

где e – заряд электрона, I_0 [A] - средний ток электронного пучка, ε_0 диэлектрическая проницаемость вакуума, γ - релятивистский фактор пучка, а R [M] – радиус поворота электронного пучка в магните. Таким образом, вклад синхротронного излучения в нагрев камеры зависит линейно от среднего тока пучка, а так же определяется энергией пучка.

Заметим, так же, что в этом случае величина поглощённой мощности не зависит ни от количества сгустков в пучке и ни от длины сгустков. Можно оценить, что, например, для типичного современного накопителя DLS с энергией 3 ГэВ, средним током в пучке 0.3 А и радиусом поворота в магните 7.15 м мощность составит 47.9 Вт/мрад. Кроме того, нагрев от излучения излучения непосредственно определяется конкретной геометрией расположения поворотного магнита, камеры вставного устройства и абсорберов, ограничивающих пучок излучения до нужных размеров по горизонтали. Точно подбирая геометрию расположения абсорбера в горизонтальной плоскости, можно минимизировать долю излучения, засвечивающего вертикальные боковые стенки камеры, расположенной снаружи траектории. Остальное излучение должно проходить дальше через камеру вставного устройства, не касаясь её стенок. Однако, принимая во внимание достаточно большую величину падающей мощности, всегда остаётся опасность

неточной выставки абсорбера и засветки стенки камеры, дающей заметный вклад в тепловую нагрузку и, следовательно, в испарение жидкого гелия.

Угловое распределение излучаемой мощности по вертикали, которое также нужно принимать во внимание, имеет вид [72]:

$$\partial P / \partial \psi = P_{SR} \cdot \frac{21}{32} \frac{\gamma}{\left(1 + \gamma^2 \psi^2\right)^{5/2}} \left[1 + \frac{5}{7} \frac{\gamma^2 \psi^2}{\left(1 + \gamma^2 \psi^2\right)} \right]$$
(5.2)

Угол ψ здесь - вертикальный угол, отсчитываемый от горизонтальной плоскости, в которой движется электронный пучок. Величиной эмиттанса И размером электронного пучка здесь пренебрегаем и предполагаем, что электронный пучок является точечным. Для простоты можно считать, что все синхротронное излучение, попадающее на стенки камеры вставного устройства, поглощается в стенках камеры. В реальной же ситуации часть падающего излучения может отражаться от внутренних стенок. При этом доля поглощённого излучения зависит как от длины волны падающего излучения, так и от угла падения и состояния поверхности стенок. Точный учёт всех этих процессов довольно трудоёмкий и удобнее считать, что вся мощность излучения идёт на нагрев в качестве оценки сверху.

Что же касается величины мощности собственного излучения вставного устройства, то, например, для 17-полюсного 7 Тл вигглера для накопителя BESSY-II [115], угловое распределение мощности излучения от которого представлено на Рисунке 269, она составляет при малых углах до ~1450 Вт/мрад, что в десятки раз превышает мощность излучения из поворотного магнита. Стоит отметить, что такой уровень мощности уже заставляет заботиться не столько о нагреве камеры, приводящем к испарению жидкого гелия, сколько о безопасной эксплуатации самого вставного устройства и окружающих его элементов. Поэтому вертикальные и горизонтальные геометрические размеры вакуумной камеры внутри вставного устройства должны учитывать с некоторым запасом не только стандартную рабочую геометрию электронного пучка (а, следовательно, и пучка генерируемого

синхротронного излучения), но также и возможные внештатные отклонения от стандартной орбиты. Так, на Рисунке 270 показаны последствия такого внештатного отклонения пучка излучения из этого вигглера по вертикали, вследствие которого были дважды расплавлены выходные части ВЧ-адаптера, соединяющего лайнер вигглера с накопительным кольцом.



Рисунок 269. Распределение мощности излучения по горизонтальному углу для 17полюсного 7 Тл вигглера для накопителя BESSY-II.



Рисунок 270. Последствия аварийного попадания пучка синхротронного излучения на ВЧ-адаптер лайнера 17-полюсного 7 Тл вигглера для накопителя BESSY-II.

5.1.2. Нагрев камеры токами изображения

Пучок заряженных частиц, циркулирующий внутри вакуумной камеры накопителя, возбуждает в электропроводящих стенках камеры токи изображения (от англ. "image currents"), которые создают электромагнитные поля, в свою очередь, воздействующие на частицы пучка. Токи изображения имеют знак заряда, противоположный знаку основного пучка и движутся рядом с этим пучком в том же направлении и с той же скоростью. Токи изображения вносят также вклад в нагрев вакуумной камеры и, таким образом, нагружают криогенную систему вставного устройства.

Для рассмотрения вклада в нагрев камеры эффектов, связанных с токами изображения, уже не достаточно рассматривать электронный пучок с точки зрения среднего тока электронов I_0 , циркулирующих по периметру накопителя, как это было в случае с синхротронным излучением (см. выражение (5.1)). Так как значение пикового тока в пучке может быть значительно выше среднего значения, то необходимо уже учитывать внутреннюю структуру циркулирующего пучка, которая представляет собой последовательность отдельных сгустков частиц, равномерно

распределённых по периметру накопительного кольца. Продольное распределение плотности заряженных частиц внутри каждого из этих сгустков хорошо описывается гауссовым распределением. Поэтому длиной сгустка σ_b принято называть величину среднеквадратичного отклонения продольного гауссовского распределения частиц. Каждый сгусток обращается с частотой повторения ускоряющего резонатора f_0 . Следовательно, зависимость от времени тока I(t), образованного сгустком заряженных частиц, имеющим форму гауссовского распределения, можно представить в виде суммы ряда Фурье-гармоник, кратных основной частоте f_0 и состоящей только из косинусов, так как нормальное гауссовское распределение является чётной функцией:

$$I_{FSum}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) [A],$$

(5.3)

где $a_0 = I_0 [A]$ – постоянная составляющая, численно равная среднему току пучка, а амплитуды остальных Фурье – гармоник вычисляются как:

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I(t) \cos(n\omega_0 t) = \frac{I_0}{f_0} \frac{4}{T} \int_0^{T/2} \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma_b}} e^{\frac{-c^2 t^2}{2\sigma_b^2}} \cdot \cos(n\omega_0 t) \quad , \qquad (5.4)$$

что даёт выражение для амплитуд:

$$a_n = 2I_0 e^{-\frac{n^2 \sigma_b^2 \omega_0^2}{2c^2}} [A]$$
(5.5)

При этом $T = 1/f_0 [c]$ и $\omega_0 = 2\pi f_0$ – период и угловая частота, соответствующие частоте ускоряющего резонатора $f_0 [c^{-1}]$, $\sigma_b[M]$ – среднеквадратичная длина сгустка, $I_0 [A]$ – усреднённый по времени ток пучка и $c = 3 \cdot 10^8 [M \cdot c^{-1}]$ – скорость света.

Можно заметить, что амплитуды Фурье - гармоник спадают до значений, близких к нулю, для частот, соответствующих длинам волн, которые короче, чем длина сгустка. Так, например, для накопителя ELETTRA, имеющего частоту резонатора $f_0 = 500 \text{ M}$ Гц, $T = 2 \cdot 10^{-9} c$ и $\omega_0 = 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 c^{-1}$, длина сгустка составляет 7.5 мм или 25 пс. На Рис. 271 показаны амплитуды первых 50 гармоник, кратных основной частоте $f_0 = 500 \text{ M}$ Гц, откуда становится очевидным, что более высокие гармоники, практически, отсутствуют. Следовательно, в данном случае достаточно суммы первых 50 гармоник с соответствующими амплитудами для правильного представления распределения тока от времени, что и представлено на Рис. 272. Из построенного таким образом графика видно, что величина пикового тока равна 6.4 А при среднем токе в накопителе всего 0.2 А и длина сгустка во времени составляет около 25 пс. Для представления более короткого сгустка понадобится большее число гармоник и, наоборот, более длинный сгусток можно описать, используя меньшее число гармоник, как очевидно из графиков на Рисунке 273 и Рисунке 274. Отметим, что при длине сгустка, например, 3.75 мм пиковый ток составит уже 12.5 А при среднем токе пучка всего 0.2 А. Можно сделать вывод, что в нагреве камеры накопителя с более короткими сгустками будет участвовать больший набор частот, чем при длинном сгустке и, поэтому в камере будет выделяться больше тепла.



Рисунок 271. Амплитуды первых 50 гармоник, кратных частоте резонатора 500 МГц. Средний по времени ток равен 0.2 А.



Рисунок 272. Ток сгустка как функция времени, описанная суммой первых 50 гармоник, кратных основной частоте 500 МГц. Средний по времени ток равен 0.2 А.



Рисунок 273. Амплитуды гармоник, кратных частоте резонатора 500 МГц для сгустков различной длины при среднем токе 0.2 А.

Рисунок 274. Ток сгустков различной длины при среднем токе пучка 0.2 А.

5.1.2.1. Резистивный нагрев камеры от классического скин-эффекта

Токи изображения, наводимые циркулирующими сгустками электронов в стенках вакуумной камеры, вносят свой вклад в нагрев камеры. Высокочастотные токи изображения не проникают вглубь металла, а концентрируются в тонком поверхностном слое камеры. Это явление, называемое классическим скинэффектом, обусловлено большой электропроводностью металлов, благодаря которой внешняя электромагнитная волна индуцирует в металле высокочастотный электрический ток, направленный таким образом, чтобы препятствовать проникновению поля внутрь металла и выталкивать его на поверхность. Благодаря классическому скин-эффекту переменное электромагнитное поле затухает вглубь проводника по экспоненциальному закону, И глубина проникновения характеризуется толщиной скин-слоя δ , на котором поле и вызываемые им токи затухают в е раз. В этом случае вся мощность выделяется именно в этом тонком поверхностном слое и от его толщины зависит величина этой мощности. Известно, что для комнатной температуры толщина «токонесущего» скин – слоя определяется как

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \,[\mathrm{M}],\tag{5.6}$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [\Gamma H/M]$ – магнитная проницаемость вакуума, ρ – удельное сопротивление металла при комнатной температуре, не зависящее от частоты, ω – угловая частота электромагнитной волны. Таким образом, в случае классического скин – эффекта проводимость материала не зависит от частоты, но толщина скинслоя уменьшается с ростом угловой частоты, как $\delta \sim 1/\sqrt{\omega}$.

Для описания тепловых потерь в тонких слоях камеры удобно использовать такую величину, как поверхностное сопротивление, которое определяется как сопротивление току, протекающему по толщине поверхности квадрата между противоположными сторонами этого квадрата и измеряемое в [Ом]. Очевидно, что определяемая таким образом величина имеет смысл удельного поверхностного сопротивления и не зависит от размера сторон квадрата. Таким образом, поверхностное сопротивление камеры в случае классического скин – эффекта можно вычислить как:

$$R_s(\omega) = \frac{\rho}{\delta(\omega)} = \sqrt{\frac{\omega\rho\mu_0}{2}} \ [OM]$$
(5.7)

Следовательно, поверхностное сопротивление возрастает по причине уменьшения толщины скин – слоя с увеличением угловой частоты как $R_s \sim \sqrt{\omega}$, что приводит к различному выделению мощности на разных частотах. Выражением (5.7) можно пользоваться для оценки поверхностного сопротивления в случае, когда камера находится при комнатной температуре. Так, например, для угловой частоты $\omega_0 = 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$ и удельного сопротивления меди $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} [\text{Om} \cdot \text{m}]$ величина поверхностного сопротивления составляет $R_s = 5.8 \cdot 10^{-3} [\text{Om}]$.

В классическом скин – эффекте предполагается, что длина свободного пробега электронов в металле λ значительно меньше толщины скин – слоя δ . В этом случае все электроны, участвующие в переносе электрического тока под действием электрического поля И испытывающие многочисленные столкновения С кристаллической решёткой, находятся внутри скин – слоя. При этом соблюдается закон Ома: $\vec{l} = \sigma \vec{E}$, где \vec{l} - плотность тока, \vec{E} - электрическое поле, а σ – проводимость, которая является константой для данного металла. Однако, при понижении температуры длина свободного пробега в металле увеличивается и даже может стать больше толщины скин - слоя. В этом случае может наблюдаться аномальный скин – эффект, при котором уже не все электроны являются равноценными с точки зрения их роли в создании высокочастотного тока. Те электроны, которые движутся под заметными углами к поверхности металла, проводят в скин – слое сравнительно небольшое время, а затем, либо рассеиваются на поверхности, либо уходят вглубь металла за границу скин-слоя и перестают участвовать в создании тока. Поэтому вклад таких электронов в поверхностный ток является незначительным и такие электроны называются «неэффективными» электронами [73, 74]. Экранирующий ток формируется в основном электронами, которые движутся под малыми углами к «эффективными» поверхности» и проходят в скин – слое путь порядка длины пробега для данной температуры $\lambda(T)$. Однако, ввиду того, что такие «эффективные» электроны составляют только малую долю от полного количества электронов, то создаваемая ими проводимость определяется соотношением между толщиной скин – слоя и длиной свободного пробега: $\sigma_{{}_{9}\phi\phi} \sim \sigma(\delta/\lambda)$, где σ – проводимость при комнатной

температуре. Следовательно, аномальный скин – эффект, который проявляется при низких температурах (растёт длина пробега) и высоких частотах (уменьшается скинслой), может приводить к заметному росту поверхностного сопротивления камеры. Теория аномального скин – эффекта была разработана, например, в работе [73], в которой учитывается уменьшение глубины скин – слоя на высоких частотах по сравнению со средней длиной свободного пробега электронов проводимости при низких температурах. Величина поверхностного сопротивления при аномальном скин-эффекте $R_{s ASE}$ даётся интерполяционной формулой:

$$R_{sASE}(\omega) = R_{\infty}(\omega)(1 + 1.157 \cdot \alpha^{-0.276})$$
для $\alpha \ge 3$, (5.8)

где безразмерный параметр α вычисляется как:

$$\alpha = \frac{3}{2} \left(\frac{\lambda}{\delta(\omega)} \right)^2 = \frac{3}{4} \omega \mu_0 (\rho \lambda)^2 \rho^{-3} \quad , \tag{5.9}$$

а сопротивление $R_{\infty}(\omega)$, не зависящее от температуры и изменяющееся с частотой $\omega^{2/3}$, дается выражением:

$$R_{\infty}(\omega) = \left(\frac{\sqrt{3}}{16\pi}\rho\lambda(\omega\mu_0)^2\right)^{1/3} [0M]$$
(5.10)

Величина произведения *ρλ* является характеристикой металла и, например, для меди равна:

$$\rho \lambda = \frac{\lambda}{\sigma} = 6.6 \cdot 10^{-16} \left[\text{OM} \cdot \text{M}^2 \right]$$
(5.11)

Предельное значение параметра *α* ≥ 3, при котором наблюдается аномальный скин – эффект, соответствует проводимости меди:

$$\sigma > \left(\frac{4}{\omega_0 \mu_0 (6.6 \cdot 10^{-16})^2}\right)^{1/3} \quad , \tag{5.12}$$

значение которой для основной частоты $\omega_0 = 2\pi \cdot 500 \cdot 10^6 c^{-1}$ будет равно $\sigma =$ $1.3 \cdot 10^{9} [1/0 \text{м} \cdot \text{м}]$. Это условно соответствует уменьшению остаточного сопротивления *RRR* в 23 раза. А для максимальной Фурье - гармоники, участвующей в представлении электронного пучка (см. Рисунок 271) с частотой $\omega \approx 40\omega_0$, $\sigma = 3.9 \cdot 10^8 [1/0 \text{M} \cdot \text{M}],$ проводимость составит что будет RRR = 7. Следовательно, соответствовать уже материалы меньшей с

проводимостью, чем у меди с RRR = 7 уже не будут подвержены аномальному скин эффекту. Ha Рисунке 275 представлена зависимость поверхностного сопротивления для меди с RRR = 100 от номеров гармоник, присутствующих в спектре электронного сгустка с длиной $\sigma_b = 7.5$ мм и током в пучке 200 мА с учётом и без учёта вклада аномального скин-эффекта. Можно заметить, что с учётом этого вклада поверхностное сопротивление возрастает с повышением частоты и для высоких частот превышает сопротивление для обычного скин – эффекта в ~2.5 раза. Таким образом, величина сопротивления упадёт на меньшее значение и реальное выделения тепла в медной камере будет больше, чем в случае игнорировании аномального скин – эффекта. Воспользовавшись выражением (5.6), оценим величину скин – слоя для первых 50 гармоник, определяющих спектр сгустка для накопителя ELETTRA, имеющего частоту резонатора $f_0 = 500 \text{ M}$ Гц, $\omega_0 = 2\pi \cdot 500 \cdot$ 10⁶с⁻¹ и длину сгустка составляет 7.5 мм или 25 пс. На Рисунке 276 представлена зависимость глубины скин – слоя от номера гармоник, из которого можно заметить, что эта величина имеет значение, меньше 1 мкм для всего представленного спектра частот.





Рисунок 275. Поверхностное сопротивление меди (RRR=100), соответствующее первым 50 гармоникам спектра сгустка, кратным основной частоте 500 МГц.



В работе [75] были получены выражения для вычисления нагрева вакуумной камеры круглого сечения токами изображения от электронного пучка, как без учёта,

так и с учётом аномального скин-эффекта. Так, предполагая, что на всех частотах спектра, представляющих сгусток, поверхностное сопротивление имеет величину, определяемую нормальным скин – эффектом (см. формулу (5.7)), величина мощности *P*, выделяемой на единицу длины *L* составит:

$$\frac{P}{L} = \Gamma\left(\frac{3}{4}\right) \frac{\sqrt{2}}{8\pi^2} \frac{C_M \sqrt{\mu\rho c}}{r\sigma_b^{3/2}} \frac{I_0^2}{M} [BT/M] , \qquad (5.13)$$

где $\Gamma\left(\frac{3}{4}\right) = 1.2254$ – Гамма – функция, C_M – длина накопителя, μ – магнитная проницаемость материала камеры накопителя, ρ – электрическое сопротивление материала камеры, c – скорость света, σ_b - среднеквадратичная длина сгустка, M – полное число сгустков, a – радиус вакуумной камеры, I_0 – средний ток накопителя.

Для аномального скин – эффекта мощность на единицу длины выражается как:

$$\frac{P}{L} = \Gamma\left(\frac{5}{6}\right) \frac{\sqrt[6]{3}}{8\pi^2 \sqrt[3]{2\pi}} \frac{C_M (\mu c)^{2/3} (\rho \lambda)^{1/3} I_0^2}{r\sigma_b^{5/3}} \frac{I_0^2}{M} [BT/M]$$
(5.14)

где $\Gamma\left(\frac{5}{6}\right) = 1.2288.$

Проанализировав эти выражения можно сделать следующие выводы:

1) В обоих случаях выделяемая мощность зависит от тока как $\propto I_0^2$, в отличие от нагрева синхротронным излучением (см. выражение (5.1)). Это даёт возможность диагностировать конкретный механизм нагрева вакуумной камеры от электронного пучка. Так, если нагрев увеличивается пропорционально току пучка $\propto I_0$, то камера нагревается синхротронным излучением. В случае же квадратичной зависимости нагрева от тока $\propto I_0^2$, причиной являются токи изображения.

2) Нагрев обратно пропорционален числу сгустков *М* и, следовательно, возрастает с увеличением тока в каждом сгустке при неизменном токе пучка.

3) Нагрев возрастает с уменьшением вертикальной апертуры камеры 2*r*. Нужно отметить, что при переходе от круглой камеры к плоской нагрев уменьшится, благодаря удалению боковых стенок.

4) Нагрев увеличивается при уменьшении длины сгустка σ_b в степени 3/2 либо 5/3,
 в зависимости от доминирующего скин-эффекта.

5) При учёте аномального скин – эффекта, мощность зависит от произведения *ρλ*, которое является характеристикой конкретного металла. В Таблице 5.1 приведены

значения этого параметра для материалов, потенциально подходящих для нанесения покрытия на холодную вакуумную камеру с целью снижения нагрева или для изготовления камеры целиком [76]. Интересно отметить, что наименьшее значение имеет алюминий, а не золото или серебро. Однако, из выражения (5.14) можно заметить что, так как мощность при аномальном скин – эффекте имеет довольно слабую зависимость от $\propto (\rho \lambda)^{1/3}$, то использование алюминия большого выигрыша не даёт. Поэтому, что касается выбора материала для изготовления лайнера, защищающего гелий в криостате вставного устройства от нагрева токами изображения при температурах ниже 20 К, разумно использовать чистую медь (что оправдано и технологически).

Таблица 5.1. Значение параметра *ρλ* и *ρ* для различных материалов при характерных температурах.

Металл	ρλ,	<i>ρ</i> при 300 К,	<i>ρ</i> при 40 К,	ρ при 4.2 К,
	Ом · м ²	Ом · м	Ом · м	Ом · м
Медь (RRR=300)	6.52×10^{-16}	1.74x10 ⁻⁸	2.95×10^{-10}	5.53×10^{-11}
Серебро (RRR=100)	8.43x10 ⁻¹⁶	1.59x10 ⁻⁸	2.9×10^{-10}	1.62×10^{-10}
Золото (RRR=100)	8.35x10 ⁻¹⁶	2.46x10 ⁻⁸	4.1×10^{-10}	2.5×10^{-10}
Алюминий (RRR=3000)	3.97x10 ⁻¹⁶	2.68x10 ⁻⁸	2.1×10^{-10}	9.0×10^{-12}

В Таблице 5.2 приведены результаты расчёта погонной мощности, выделяемой на лайнере, изготовленном из различных материалов для нескольких характерных температур. В качестве накопителя для установки лайнера выбран условный накопитель с характерными параметрами: длина окружности $C_M = 300$ м, число сгустков M = 330, длина пучка $\sigma_b = 4$ мм, ток пучка $I_0 = 1$ А, апертура камеры 2r = 5 мм, основная частота $f_0 = 500$ МГц.

Таблица 5.2. Зависимость погонной мощности, выделяемой на лайнере из разных материалов при нескольких характерных температурах без учёта и с учётом аномального скин - эффекта.

Материал	Т,К	<i>ρ</i> ,0м · м	α	<i>P/L</i> , Вт/м	<i>P/L</i> , Вт/м
				(Классический)	(Аномальный)
Cu, RRR = 300	300	1.74x10 ⁻⁸	0,000239	80.81	80.8
Cu, RRR = 300	40	2.95×10^{-10}	49.03	10.52	21.3
Cu, RRR = 300	4.2	5.53×10^{-11}	7443	4.56	16.7
Cu, RRR = 10	300	1.81x10 ⁻⁸	0.000212	82.42	82.4
Cu, RRR = 10	40	1.88x10 ⁻⁹	0.189	26.56	26.7
Cu, RRR = 10	4.2	1.81x10 ⁻⁹	0.212	26.06	26.2
A1, RRR = 3000	300	2.68×10^{-8}	0.000024	100.29	100.3
A1, RRR = 3000	40	2.10×10^{-10}	50.39	8.88	18.0
A1, RRR = 3000	4.2	9.0×10^{-12}	640139	1.84	13.3

В качестве комментария к этой таблице можно отметить, что для сочетания параметров, при которых значение α из формулы (5.9) больше, чем 3, учет аномального скин – эффекта дает возрастание мощности у чистой меди от ~2 раз при 40 К до ~4 раз при 4.2К и у сверхчистого алюминия от ~2 раз при 40 К до ~7 раз при гелиевой температуре. При этом у обычной меди с низким RRR=10 параметр $\alpha < 3$ и аномальный скин – эффект не проявляется вообще. Однако абсолютные значения выделяемой мощности у хорошей бескислородной меди и сверхчистого алюминия отличаются незначительно. Таким образом, при выборе материала для изготовления лайнера определяющим фактором являются скорее технологические возможности и в нашем случае выбор был остановлен на меди.

5.1.2.3. Учёт магниторезистивного эффекта в нагреве камеры

Следующим фактором, вклад которого приходится учитывать в балансе тепловыделения на камере вставного устройства – это магниторезистивный эффект, который ограничивает проводимость материала, находящегося в магнитном поле. Качественно наличие магниторезистивного эффекта можно объяснить отклонением траекторий электронов, участвующих в переносе тока в металле, под действием силы Лоренца. Без магнитного поля носители заряда движутся прямолинейно на длине свободного пробега, а при наличии магнитного поля траектория между столкновениями превращается в спираль. При равномерном распределении центров рассеяния движущихся носителей тока в металле число актов рассеяния на единицу длины будет одинаковым. Но поскольку за время свободного пробега, двигаясь по спирали в присутствии магнитного поля, электрон будет проходить меньший путь вдоль образца, то это равносильно уменьшению дрейфовой скорости носителей заряда, а тем самым, и проводимости, то есть сопротивление материала должно Можно заметить, что, так как понижение температуры увеличивает возрастать. свободного пробега, длину то влияние магнитного поля на увеличение металла быть сопротивления должно особенно заметно при криогенных большом уровне В температурах И поля. таких условиях проявление магниторезистивного эффекта будет более всего проявляться у чистых металлов, имеющих большую длину свободного пробега, например, у меди и алюминия. А так как именно эти материалы являются очевидным выбором для изготовления камеры вставного устройства, то при проектировании камеры необходимо учитывать влияние и этого эффекта.

Магнетосопротивлением принято называть соотношением между сопротивлением при конечном магнитном поле и сопротивлением в отсутствие магнитного поля. Качественно мерой влияния магнитного поля на траекторию электрона можно считать соотношение между длинной свободного пробега одного электрона λ и радиусом кривизны его траектории r_B в магнитном поле *B*. Этот

эффект был изучен Колером, который сформулировал правило, согласно которому относительное изменение удельного сопротивления металла является функцией от величины магнитного поля B, отнесенного к его начальному удельному сопротивлению ρ_0 .

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\rho(B,T) - \rho(0,T)}{\rho(0,T)} = f\left[\frac{B}{\rho(0,T)}\right]$$
(5.15)

Эмпирическая формула, описывающая зависимость сопротивления металла от магнитного поля и температуры выглядит как [77]:

$$\rho(B,T) = \rho(0,T) \times (1 + 10^{1.0055 \log_{10}(B \cdot RRR) - 2.69}) \quad , \tag{5.16}$$

где $\rho(B,T)[OM \cdot M]$ – сопротивление материала, $B[T_{\Lambda}]$ – магнитное поле, а RRR – отношение удельного электрического сопротивления материала при комнатной температуре к сопротивлению при температуре T: $RRR = \frac{\rho_{300K}}{\rho_{(T)}}$.

Простая оценка показывает, что для характерной температуры T = 20К, при которой может находиться лайнер, и величины магнитного поля 8.386 Тл (заметим, что в 17 – полюсном вигглере для BESSY-II величина максимальная поля имела сравнимое значение 7.67 Тл) и для меди с RRR = 100 величина сопротивления возрастает в ~3.5 раза с $\rho_0(20K) = 1.55 \cdot 10^{-10} [\text{Ом} \cdot \text{M}]$ до $\rho(B,T) = 5.39 \cdot 10^{-10} [\text{OM} \cdot \text{M}]$. В Таблице 5.3 приведены результаты исследования влияния магнитного поля на нагрев пучком медной камеры LHC, которые были представлены в работе [78]. Здесь были сделаны оценки с учётом и без учёта аномального скин – эффекта, а также экспериментальные результаты для меди с RRR=60 для сверхпроводящего диполя LHC с полем 8.386 Тл.

	Магнитное поле 0 Тл	Магнитное поле 8.386
		Тл
$ ho(B,T)$, Ом \cdot м	$2.58 \cdot 10^{-10}$	$6.31 \cdot 10^{-10}$
P _{classical} /L, Вт/м	0.058	0.088
P _{anomalous} /L, Вт/м	0.074	0.096
$P_{empirical}/L$, Вт/м	0.12	0.129
$P_{empirical}/P_{anomalous}$	1.62	1.34

Таблица 5.3. Оценка вклада магнито – резистивных потерь в нагрев стенок медной камеры (RRR=60) для сверхпроводящего диполя LHC с полем 8.386 Тл.

Из этих данных можно заметить, что магнитное поле даёт вполне заметный вклад в мощность потерь. В данной работе указывается, что расхождение предсказанных и измеренных значений можно объяснить, например, влиянием шероховатости поверхности, увеличивающей потери. Что касается учёта влияния магнитного поля конкретно для многополюсного вставного устройства на нагрев камеры, то нужно иметь в виду, что вследствие периодического изменения магнитного поля в такой структуре можно учитывать некоторую среднюю величину магнитного поля.

5.1.2.4. Влияние шероховатости на нагрев камеры

Состояние внутренней поверхности камеры также может существенно влиять на величину её поверхностного сопротивления. Реальная поверхность не является плоской, а имеет некоторый профиль, называемый шероховатостью. Так как в спектре токов, наведённых на поверхности, присутствуют широкий набор частот, то каждой частоте будет соответствовать своя толщина скин – слоя. Следовательно, токи низких частот будут протекать на большей глубине материала камеры, и вызывать меньший нагрев, а высокочастотные составляющие токов, для которых толщина скин – слоя мала, будут протекать только в тонком поверхностном слое. Если толщина соответствующего скин – слоя становится сравнимой величиной шероховатости поверхности, то ток будет протекать именно по этим неровностям шероховатой поверхности. В этом случае, как минимум, увеличивается длина пути для таких токов, что можно трактовать как увеличение поверхностного сопротивления на высоких частотах и соответствующего вклада в нагрев камеры. Точный численный расчёт поверхностного сопротивления на высоких частотах является довольно специфической задачей, так как для этого требуется детальная информация о шероховатости поверхности. Однако, из общих физических соображений ясно, например, что окончательная чистовая обработка внутренней поверхности камеры должна производиться в направлении пролёта пучка, чтобы уменьшить неизбежные царапины и неровности именно в этом направлении.

Что касается конкретных материалов, которые можно использовать для изготовления камеры вставного устройства, то выбор их практически ограничен медью, алюминиевыми сплавами, либо нержавеющей сталью с медным покрытием. Однако технология нанесения гальванического медного покрытия не всегда позволяет получить слой хорошего качества. Обычно наносится слой меди толщиной 50 мкм с промежуточным слоем хрома толщиной несколько микрон. Как можно заметить из Рисунка 276, характерная для типичных параметров пучка накопителя глубина скин – слоя, по которому протекают токи изображения практически всех присутствующих частот, наводимые пучком составляет менее 1 мкм. Следовательно, с точки зрения протекания токов достаточно иметь в этом случае слой меди порядка всего нескольких микрон. Однако, исходя из существующих технологий нанесения тонких покрытий, для получения хорошей гладкой поверхности необходимо нанести слой не менее 40-50 мкм. К сожалению, точный химический состав такого гальванического покрытия может быть не всегда предсказуем, как и реальное значение RRR. Поэтому после изготовления было бы полезно проводить соответствующие измерения химического состава нанесённого покрытия, а лучше всего проводить прямое измерение RRR в криогенных температурах.

Именно такое покрытие наносилось, например, на вакуумные камеры в проекте LCLS (Linear Coherent Light Source) в центре SLAC и вопрос о реальных свойствах медного покрытия обсуждался во многих, связанных с этим проектом работах, например в [79]. В работе [80], в которой проводилось исследование

различных способов моделирования шероховатости с точки зрения расчётов нагрева камеры электронным пучком, были выведены общие критерии для оценки вклада шероховатости в нагрев камеры. Так, в качестве критерия для оценки влияния шероховатости (см. Рисунок 277) было предложено использовать, с одной стороны, соотношение между глубиной неровностей h и расстоянием между ними g, а с другой, соотношение длины сгустка σ_b и расстояния между неровностями g. Было показано, что нагрев камеры будет пренебрежимо мал при соблюдении следующих условий:



Рисунок 277. Условное изображение характерных параметров шероховатости поверхности, определяющих нагрев камеры током пучка: h – глубина впадин (выступов), g – расстояние между неровностями, b – внутренний радиус камеры, σ_b -длина сгустка.

Таким образом, чем мельче по глубине и реже встречаются характерные неровности поверхности и чем больше при этом размер сгустка, тем меньшее влияние оказывает шероховатость поверхности на нагрев камеры, что очевидно и с физической точки зрения. Оценим влияние шероховатости медной камеры вставного устройства, при установке его на накопителе ELETTRA. На Рисунке 278 показан образец профиля поверхность типичной гальванически нанесённой меди, снятый электронным микроскопом, взятый в качестве примера из работы [80]. Так, считая, что характерные неровности гальванически нанесённого медного покрытия имеют характерные размеры $h \sim 1$ мкм и протяженность этих неровностей составляет $g \sim 30 - 40$ мкм, то при длине сгустка $\sigma_b \sim 7.5$ мм нагрев, определяемый шероховатостью можно не принимать во внимание. Однако качество реального

покрытия всегда имеет некоторый разброс, вплоть до отслаивания от подложки, поэтому пренебрегать хорошей гладкостью поверхности не стоит.



Рисунок 278. Образец профиля поверхности гальванически нанесённой меди, полученный на электронном микроскопе [**80**].

Вакуумные камеры из нержавеющей стали с медным покрытием можно проводки электронного пучка через использовать для магнитный зазор сверхпроводящих вставных устройств для уменьшения зазора и увеличения уровня магнитного поля. Но при этом нужно иметь в виду, что практически вся тепловая мощность, выделяемая в такой камере, которая является одновременно и стенкой гелиевого сосуда, идёт непосредственно на испарение жидкого гелия. Поэтому при проектировании криостата многополюсного вигглера для накопителя ELETTRA было предложено для экономии жидкого гелия отделить функцию вакуумной камеры из нержавеющей стали (которая являлась бы только стенкой вакуумного cocyдa) от полностью медной камеры, предназначенной только для тепловой изоляции гелия и размещённой с минимальным зазором внутри первой камеры. Было сделано предположение, что такая независимая медная камера конструктивно позволила бы изолировать гелий не только от нагрева, связанного с электронным пучком и синхротронным излучением, но и с теплопритоками по теплопроводности по телу самой медной камеры снаружи криостата вставного устройства. К тому же, с точки зрения шероховатости поверхности таких камер, изготовленных из цельных медных заготовок с заранее известным механическими и физическими и свойствами (в том числе - и значением RRR), технологически гораздо проще обеспечить необходимое качество поверхности с помощью механической полировки, чем на внутреннем покрытии, нанесённом гальванически. Оборотной стороной такого конструктивного решения становится вынужденное увеличение магнитного зазора и, связанное с этим, уменьшение величины поля. Однако, было сделано предположение, что преимущество от надёжной изоляции обмоток магнита от нагревающего воздействия со стороны пучка, позволит сместиться ближе к критическим токам провода за счёт хорошего охлаждения и, таким образом, компенсировать потери поля от уменьшения зазора.

5.2. Выбор конфигурации вакуумной камеры для пучка

Кроме резистивных потерь, существуют также и потери, связанные с геометрией вакуумной камеры. Важность проблемы устойчивости пучка, особенно в современных ускорителях с высокой интенсивностью, заставляет тщательно заботиться о конфигурации вакуумной камеры с точки зрения взаимодействие пучка с камерой ускорителя. Для описания такого взаимодействия обычно используют импедансов связи пучка с вакуумной камерой или связанные с ними понятие понятия наведённых потенциалов (от англ. "wake" - наведённый). Полный импеданс является комплексным сопротивлением, зависящим от частоты и его спектр определяется конкретной геометрией вакуумной камеры. Потери, связанные с взаимодействием с камерой, пропорциональные пучка току пучка И суммирующиеся по всей длине камеры, можно интерпретировать как суммарный импеданс вакуумной камеры. В принципе, величина суммарного импеданса является мерой качества проектирования и изготовления все вакуумной камеры в целом.

При взаимодействии пучка с камерой могут возникать неустойчивости, приводящие как к ухудшению качества пучка (росту эмиттанса), так и к ограничению тока. Вообще говоря, этот эффект будет тем сильнее, чем ближе пучок располагается к стенке (меньше апертура вакуумной камеры) и чем хуже электропроводность стенок камеры. Причинами, определяющими увеличение импеданса и, следовательно, энергетических потерь в виде нагрева камеры, а также ухудшения качества пучка, являются (кроме омического сопротивления стенок камеры) скачки и переходы сечения, вакуумные фланцы, сильфоны, резонаторы, элементы диагностики (датчики положения пучка) и инжекции (кикеры), вакуумные насосы и другие. Воздействие вакуумной камеры на пучок может приводить к следующим эффектам, вызывающим нестабильности:

1. Взаимодействие пучка с продольным импедансом может приводить к удлинению сгустка и увеличению энергетического разброса частиц в пучке, благодаря возбуждению продольных колебаний.

2. Резонансное взаимодействие частиц хвостовой части пучка с короткоживущими поперечными wake-полями, наведёнными головной частью того же пучка, является причиной неустойчивости, называемой head-tail эффект (голова - хвост), при которой может нарастать амплитуда бетатронных колебаний и потеря частиц пучка.

3. Взаимодействие пучка с долгоживущими wake-полями, наведёнными головными сгустками, которые воздействуют на последующие сгустки, может приводить к продольной и поперечной неустойчивости в многосгустковом режиме.

Поэтому общими критериями при проектировании вакуумной камеры вставного устройства с точки зрения нагрева камеры и влияния на динамику пучка является строгое соблюдение следующих требований:

1. Гладкость формы внутренней поверхности камеры;

2. Отсутствие механических ступенек и зазоров с полостями в местах стыковки различных элементов камеры;

3. Выбор материала с хорошей электропроводностью, лучше всего меди или алюминия;

4. Шероховатость внутренней поверхности должна быть минимальной – лучше меньше ~1мкм, что достигается исключительно полировкой поверхности;

5. Конусность переходных элементов должна иметь наклон не более 5-10 градусов.

Очевидно, что учёт всех вышеупомянутых эффектов взаимодействия пучка со стенками камеры является очень важным при проектировании вставного устройства хотя бы в силу того, что установка его на накопитель может потенциально ухудшить качество пучка, что конечно, недопустимо.

Тем не менее, можно предположить, что при соблюдении всех необходимых стандартных требований сравнительно короткая камера такого вставного устройства, скорее всего, не окажет заметного влияния на работу всего накопителя в целом на фоне остальной камеры накопительного кольца. А вот с точки зрения нагрева следует иметь ввиду, что тепловая мощность, выделяемая непосредственно в камере сверхпроводящего вставного устройства может приводить не только к дополнительному испарению жидкого гелия в криостате, но, в худшем случае, даже сверхпроводящих обмоток И провоцировать нагрев выволить ИХ ИЗ сверхпроводящего состояния. Поэтому очевидно, что нахождение правильного технического решения при выборе, как самой концепции, так и конкретной компоновки вакуумной камеры для пролёта пучка, определяет не только расход жидкого гелия, но и общую работоспособность всего вставного устройства в целом.

Рассмотрим возможные варианты таких конструктивных решений:

1. Несомненно, что самым надёжным и безопасным решением в смысле защиты сверхпроводящих обмоток и жидкого гелия от нагрева пучком является одновременное размещение в межполюсном зазоре магнита следующих элементов:

1) Тёплой вакуумной камеры для пролёта пучка, имеющей комнатную температуру,

2) Промежуточного защитного экрана, охлаждаемого до криогенной температуры,

3) Холодной вакуумной камеры, являющейся одновременно стенкой гелиевого сосуда.

Именно так и было организовано межполюсное пространство сверхпроводящих шифтеров (см. Рисунок 279). Пространство между тёплой и холодной камерами является при этом частью защитного вакуума криостата. В этом случае, если пренебречь теплопроводностью по остаточному газу в защитном вакууме криостата, то вся мощность, выделяемая на тёплой вакуумной камере, должна надёжно отводиться теплопроводностью самой вакуумной камеры, либо перехватываться в виде излучения на промежуточный тепловой экран. В такой конструкции даже значительный перегрев камеры со стороны пучка не должен приводит к неблагоприятным последствиям для сверхпроводящего магнита и жидкого гелия.



Рисунок 279. Сечение межполюсного зазора сверхпроводящего шифтера, включающего медный экран и тёплую камеру.

2. Однако недостатком этого подхода является то, что для достижения больших значений магнитного поля выгодно было бы уменьшать межполюсной зазор, а наличие нескольких элементов внутри него ограничивает эту возможность. Это ограничение особенно критично для многополюсных вигглеров, так как для повышения яркости излучения из такого вставного устройства необходимо разместить на доступной длине прямолинейного промежутка как можно больше полюсов. Однако при увеличении зазора приходится либо ограничивать число полюсов, растягивая период, либо уменьшать уровень поля. Ив этом случае единственной доступной возможностью (при условии уже проведённой оптимизации токов в обмотке) является как раз уменьшение магнитного зазора, как это следует из графика на Рисунке 10. Для устранения этого недостатка можно удалить из магнитного зазора один из элементов – тёплую вакуумную камеру. В этом случае необходимо для изоляции вакуума ускорителя от защитного вакуума криостата либо

сделать вакуумно-герметичным оставшийся тепловой экран, либо, что более разумно, перенести функцию герметичной вакуумной камеры только на холодную камеру гелиевого сосуда (соединив её герметичными сильфонами с камерой накопителя), а тепловой экран герметичным не делать. Таким образом, из зазора удаляется один «лишний» элемент, как показано на Рисунке 280. Очевидно, что обратной стороной такого подхода является то, что теперь вся тепловая нагрузка со стороны пучка автоматически переходит от тёплой камеры на защитный экран, который будем называть лайнер (от английского " liner" – вкладыш, вставка). Следовательно, основная проблема, которая возникает при такой компоновке, это надёжный отвод тепла, выделяемого на лайнере и тепловая изоляция его от гелиевого сосуда.



Рисунок 280. Сечение межполюсного зазора, включающего гелиевую вакуумную камеру и лайнер.

3. Следующим вариантом может быть отказ от использования медного лайнера и перенесение его функций на медный слой, нанесённый на внутреннюю поверхность холодной камеры. Это, безусловно, даст возможность ещё уменьшить магнитный зазор, однако такой подход резко снижает надёжность работы магнита и увеличивает расход жидкого гелия, так как теперь вся выделяемая от пучка мощность будет нагревать гелиевый сосуд. Так, например, обменённая камера из нержавеющей стали была использована на 47-полюсном 3.5Tл вигглере на накопителе MAX-II (Швеция). Но, судя по данным, приведённым в работе [**81**], расход гелия в этом вставном устройстве при включении максимального тока в пучке 200 мА достигал 2.5 л/ч, что эквивалентно теплопритоку 1.8 Вт, а в отсутствие пучка 1.5 л/ч, что соответствует мощности 1.1 Вт. В результате при объёме гелия в криостате 320 л потребовалась заправка каждые 5 дней. Данные по мощности, выделяющейся на этой камере, благодаря воздействию пучка, представлены в Таблице 5.4.

Таблица 5.4. Теплопритоки на омеднённой вакуумной камере, вызываемые электронным пучком на накопителе МАХ-II (Швеция) [81].

	Измеренное значение		Предсказано
			расчётами
Длина сгустка σ_b , мм	24	7.5	24
Синхротронное излучение, Вт(л/ч)	0.26 (0.37)	0.26 (0.37)	0.12(0.17)
Токи изображения, Вт(л/ч)	0.60 (0.83)	1.37 (1.92)	0.05(0.07)
Всего от пучка Вт, (л/ч)	0.86 (1.20)	1.63 (2.29)	0.17(0.24)

Таким образом, нагрев, определяемый током пучка составил 0.86 Вт (1.2 л/ч), в которых 0.59 Вт давал вклад токов изображения, а 0.26 Вт добавляло синхротронное излучение. Разделить эти вклады по мощности удалось, благодаря характерной квадратичной зависимости нагрева от тока пучка, определяемой выражением (5.14), в отличие от синхротронного излучения, которое имеет линейную зависимость (см. выражение (5.1)). Интересно отметить, что зависимость выделения мощности от длины пучка хорошо согласуется с формулой (5.14). Авторы этой работы признают, что реальный расход гелия от токов изображения (0.83 л/ч) превысил расчётный расход (0.07 л/ч) более, чем в 10 раз. Среди вероятных причин такого несоответствия расчётам авторы указывают на возможно плохое качество медного покрытия, имеющее в данном случае RRR, дающее сопротивление сравнимое с нержавеющей сталью, что во много раз больше ожидаемого и может увеличивать резистивные потери. В качестве другой причины предполагается плохое качество контакта при стыковке камеры вигглера и камеры ускорителя, что даёт нагрев, определяемый высоким импедансом. Важно отметить, что отделить в этом случае

резистивные потери от влияния импеданса, практически, невозможно, так как эффект нагрева от их воздействия в обоих случаях зависит от тока квадратично. Обратим внимания также на то, что нагрев синхротронным излучением также вдвое превышает расчётное значение, возможно, по причине ошибки в выставке приёмника излучения. Этот пример указывает на отсутствие надёжных методов расчёта таких эффектов и иллюстрирует, что расчёты мощности, выделяемой на камере пучка, могут иметь только оценочное значение и всегда зависят от реально изготовленной камеры и её размещения в криостате. Опять же этот пример даёт представление о том, насколько реальным может быть технический риск при создании такого рода устройств.

4. Если идти ещё дальше, то для получения максимально возможного уровня магнитного поля, можно попробовать вообще отказаться от использования жидкого гелия для охлаждения и поддержания криогенной температуры на обмотках сверхпроводящего магнита. В этом случае магнит должен быть «сухим», целиком размещаться в вакуумном объёме криостата, а охлаждаться только контактным способом, непосредственно используя мощность криокулеров. Таким образом, в магнитном разоре вигглера останется только одна вакуумная камера для пролёта пучка, и она же будет служить для защиты обмоток от тепловой нагрузки.

5. Конечно, можно сделать и чисто гипотетическое предположение о полном удалении вакуумной камеры пучка из магнитного зазора и размещении сверхпроводящих обмоток непосредственно возле орбиты пучка для достижения предельно возможного уровня поля. Но осуществить такое решение на практике, скорее всего, будет непросто, как минимум, по двум причинам:

1) Нагрев сверхпроводящих обмоток со стороны пучка станет уже критическим с точки зрения величины протекающего по ним тока, а уменьшение уровня тока в обмотках до безопасного значения понизит уровень поля и перечеркнёт преимущества от использования сверхпроводящих технологий. Более того, резистивные потери такого участка будут, скорее всего, довольно большим, благодаря наличию материалов с плохой электропроводностью (стеклотекстолит, эпоксидный компаунд), что будет вызывать дополнительный нагрев обмоток;

2) Обмотки, пропитанные эпоксидным компаундом и расположенные непосредственно в вакууме накопителя, не будут удовлетворять требованиям, предъявляемым к сверхвысоковакуумным элементам, испортят вакуумную обстановку возле вигглера и приведут к уменьшению времени жизни пучка в накопителе.

В итоге, рассмотрев все перечисленные варианты конфигурации межполюсного зазора, и, исходя из задачи надёжного получения максимально возможного уровня поля на сверхпроводящих обмотках в многополюсных вставных устройствах, размещённых в сосуде с жидким гелием, была выбрана концепция удаления тёплой вакуумной камеры и размещения в зазоре только медного лайнера для защиты магнита от нагрева. Охлаждение лайнера должно было производиться двумя криокулерами SRDK-408S2, расположенными по обоим концам камеры (см. Рисунок 281) и имеющими холодильную мощность, не менее 12 Вт на второй ступени при температуре 20 К, судя по нагрузочным кривым на Рисунке 137d.



Рисунок 281. Схема охлаждения лайнера двумя криокулерами SRDK-408S2.

5.3. Использование медного лайнера на вигглере ELETTRA

Одним из первых вставных устройств с такой компоновкой стал 45 полюсный 3.5 Тл вигглер для источника синхротронного излучения ELETTRA [61, 67, 116, 117, 144]. В процессе проектирования возникали вполне оправданные опасения по

поводу вакуумных условий в камере вигглера, которые могли испортиться благодаря полости, образовывающейся между лайнером и холодной камерой. Для откачки этой полости через камеру для пролёта пучка необходимо было заложить в конструкцию лайнера некие специальные отверстия достаточного сечения. При этом, естественно, встал вопрос о форме и расположению таких отверстий с точки зрения возможного увеличения импеданса и выделения дополнительного тепла изза нарушения гладкости камеры. Обычно импеданс различных участков вакуумной камеры можно просто просуммировать, так как наведённые поля возбуждаемые пучком в различных компонентах вакуумной камеры, быстро затухают и можно пренебречь их интерференцией между собой. Но в случае, когда через элемент проходит периодическая последовательность сгустков и поля, возбуждаемые передними, не успевают затухнуть к моменту прихода последующих сгустков, существенно интерференция полей может увеличить потери энергии И спровоцировать возбуждение неустойчивости. Проведение точного анализа и последующей проверки влияния такого тонкого эффекта на импеданс лайнера и, следовательно, на величину энергетических потерь пучка, идущих на его нагрев, является очень специфической и довольно трудоёмкой задачей. Однако аналогичная проблема уже была решена, например, при проектировании формы лайнера для коллайдера LHC. Судя выводам, сделанным в работе [82], импеданс и, следовательно, потери от дополнительных отверстий должны были вырасти незначительно. В этой работе рассматривалось влияние откачных отверстий на друг от друга, так и с точки зрения возможного импеданс как независимо регулярно расположенных отверстий с пучком. резонансного взаимодействия Авторами было показано, что даже в случае резонансного взаимодействия электромагнитного поля пучка с регулярными отверстиями вклад в увеличение импеданса будет пренебрежимо малым по сравнению с резистивными потерями (в частности из-за естественных погрешностей в процессе изготовления этих отверстий). Поэтому для проектируемого лайнера нами была применена именно такая конструкция. При этом при выборе формы отверстий и их расположения принималось во внимание следующее:

1. Так как, судя по выводам из работы [82], скачок импеданса происходит именно на краю каждого отверстия, то выгоднее всего иметь одно откачное отверстие в виде длинной щели вместо расположенных в ряд вдоль оси пучка нескольких круглых отверстий эквивалентной площади;

2. Размещать откачные отверстия выгоднее всего подальше от оси пучка, в нашем случае – на большой оси эллиптического сечения лайнера;

3. Для простоты изготовления было решено изготовить отверстия в виде продольных пазов и именно регулярным образом, игнорируя возможный резонансный эффект, считая его незначительным.

На Рисунке 282 показан внешний вид лайнера для вигглера ELETTRA с откачными щелями в процессе его изготовления. На Рис 283 для сравнения приведён внешний вид откачных щелей лайнера LHC.



Рисунок 282. Щели для вакуумной откачки Рисунок 283. Щели для вакуумной на половинках лайнера для вигглера откачки на лайнере для LHC. ELETTRA в процессе изготовления.

Очевидно, что отход от уже проверенной схемы с тёплой камерой и использование лайнера для перехвата тепловой нагрузки представлялся довольно рискованным, как с точки зрения возможного увеличения расхода жидкого гелия, так и увеличения вероятности потери сверхпроводимости при инжекции. И, кстати говоря, проблемы со сбросами сверхпроводимости во время инжекции проявились в дальнейшем, например, на 2 Тл вигглере для источника CLS (Canadian Light Source),

как было описано в Главе 3.2. Однако, приоритет в данном случае был отдан получению большего поля за счёт уменьшения магнитного зазора.

Но, как оказалось, первый опыт использования лайнера не был успешным. При первом же включении вигглера новой компоновки с пучком на накопителе ELETTRA выяснилось, что испарение гелия не просто подросло, а повысилось многократно, по сравнению с шифтерами, имевшими тёплую камеру. Так, при токе пучка 200 мА расход гелия составлял 5 л/ч, в то время как в отсутствие пучка этот параметр не превышал 0.6 л/ч [61]. При этом температуры на обоих концах лайнера, соединённого тепловодами с 20 К ступенями криокулеров Leybold Coolpower 10 MD, повышались с 13 К в отсутствие пучка до 23 К с током пучка 200 мА, как показано Рисунке 284. Полезно обратить внимание на то, то температура на первых на ступенях криокулеров при этом, практически, не менялись, так как обе ступени работают независимо, что можно увидеть и по нагрузочным кривым криокулера на Рисунке 137. Из тех же нагрузочных кривых можно сделать вывод, что повышению температуры на 10 К (с 13 К до 23 К) соответствует повышение мощности, подводимой от лайнера ко второй ступени с 8 Вт до 20 Вт. Таким образом, вклад в нагрев лайнера от пучка накопителя составлял по 12 Вт на каждый криокулер и, следовательно, суммарно 24 Вт. Эквивалентное повышение расхода гелия с 0.6 до 5 л/ч соответствует увеличению притока мощности от лайнера в гелиевый сосуд на 3.14 Вт (с 0.43 Вт до 3.57 Вт). Такая неожиданно высокая мощность, а главное, совершенно неприемлемый расход гелия никак не стыковались с предварительными оценками, которыми, как уже выяснилось, например, из работы [81], нужно доверять с осторожностью. Но такой большой приток мощности превосходил даже экспериментальные результаты из этой же работы, которые для гораздо худшей ситуации составлял "всего" 0.86 Вт. Получалось, что медный слой 50 мкм не самого хорошего качества, гальванически нанесённый на камеру из нержавеющей стали, имеющую непосредственный контакт с жидким гелием, нагревал гелий в ~3.6 раза меньше, чем отдельный медный лайнер, отделённый зазором от гелиевой камеры.



Рисунок 284. Температура на концах лайнера ELETTRA в зависимости от тока пучка (нагрев за счет откачных щелей). Расход гелия меняется от 0.6 до 5 л/ч.

Был проведён анализ всех возможных причин такого высокого расхода. При этом нельзя было исключать и такие простые причины, как засветка синхротронным излучением от предыдущих поворотных магнитов. Однако исследование зависимости величины расхода гелия от тока пучка показало, что эта зависимость имеет именно квадратичный характер. Это сразу исключало вариант с нагревом синхротронным излучением, так как он должен был иметь линейную зависимость от тока (см. формулу (5.1)). Оставалось найти причину такого аномально большого импеданса участка с вакуумной камерой вигглера, так как именно эта причина могла, скорее всего, давать квадратичную зависимость (см. формулу (5.24)). В качестве иллюстрации проявления именно квадратичной зависимости выделяемой в лайнере мощности от тока пучка на Рисунке 285 представлены результаты измерения этой зависимости, проведённой на накопителе DLS с 45-полюсным 4.2 Тл вигглером, описанные в работе [85]. Было измерено изменение мощности, нагревающей вторую 20 К ступень криокулера, отнесённую к току одного сгустка в накопителе для разного количества сгустков. Натянутая на измеренные данные кривая имела квадратичную зависимость, доказывающую, что тепловыделения В данном случае вызваны именно токами изображения.



Рисунок 285. Тепловая нагрузка на лайнер в зависимости от тока одного сгустка для 45-полюсного 4.2 Тл вигглера на накопителе DLS [85].

Причинами такого экстремального выделение тепла на лайнере вигглера ELETTRA могли быть, как резистивный нагрев, зависящий от состояния поверхности лайнера, так и радиочастотная составляющая от ступенек, зазоров и полостей на переходе от лайнера в вакуумной камере накопителя. Также было высказано предположение, что причиной нагрева могла быть и периодическая структура в виде системы продольных отверстий, предназначенных для увеличения скорости вакуумной откачки из полости между лайнером и холодной камерой за счёт резонансного эффекта взаимодействия с электромагнитным поле пучка. Возможно, этот резонансный эффект стал бы гораздо меньшим, если бы расположение отверстий не было бы строго регулярным. Однако, проведение точного анализа данной конструкции и последующей проверки влияния такого тонкого эффекта на импеданс лайнера и, следовательно, на величину энергетических потерь пучка, идущих на его нагрев, являлось очень специфической и довольно трудоёмкой задачей. Более того, точно измерить количественно и выделить величину именно этих потерь можно было только по изменениям распределения температур внутри криостата и расхода жидкого гелия, что также зависит одновременно от многих факторов. Как уже упоминалось в Главе 5.2, результаты таких расчётов довольно часто не совпадают с реальными измерениями, так как величина этих потерь составляет всего несколько Вт на фоне нескольких кВт, содержащихся в пучке.

Ещё одним характерным примером плохой предсказуемости таких расчётов может являться анализ величины нагрева вакуумных камер, описанный в работе [83]. Здесь была предпринята попытка осуществления системного подхода в изучении проблемы нагрева криогенных вакуумных камер вставных устройств электронным пучком. Для этого был изготовлен специальный криостат, названный COLDDIAG (Cold Diagnostic) позволяющий моделировать различные механизмы взаимодействия пучка с вакуумной камерой. Эта установка была последовательно установлена на нескольких источниках синхротронного излучения, таких как MAX-II, DLS и ANKA, имеющие различные параметры пучка. Результаты измерений и сравнение выделяющейся мощности с расчётами представлены в Таблице 5.5. Анализ этих данных приводит к выводу, что проблема предсказания тепловых потерь в криогенных камерах для вставных устройств ещё довольно далека от своего решения, так как расхождения в оценках и измерения расходятся в десятки раз.

Таблица 5.5. Результаты расчётов и измерений тепловых потерь электронного пучка на вакуумной камере.

Источник	Предска	Измеренные	
СИ	Резистивные потери, Вт	Синхротронное излучение, Вт	потери, Вт
DLS	0.05	0.2	8
ANKA	0.022	0.063	2.5

Поэтому, осознавая сложность задачи, проводить дальнейшие эксперименты в этом направлении и изготавливать новый лайнер с отверстиями, специально имеющими нерегулярное расположение для устранения возможного резонансного взаимодействия с пучком, было признано нецелесообразным. И для радикального устранения именно этого возможного канала притока тепла в жидкий гелий было предложено изготовить новый лайнер с полностью гладкой поверхностью, без каких либо отверстий, а отверстия для вакуумной откачки из полости между лайнером и гелиевой камерой перенести на торцевые поверхносты медных теплосъёмных фланцев. Общее проходное сечение этих отверстий, конечно же, уменьшилось, но должно было лишь ненамного ухудшить скорость откачки. Кроме того, холодные поверхности, как вакуумной камеры гелиевого сосуда с температурой 4 К, так и самого лайнера, имеющего рабочую температуру ~10 К, представляют собой мощные криогенные насосы, которые значительно улучшают вакуумные условия в камере возле вигглера. Хотя, с другой стороны, это накладывает и некоторые ограничения на скорость ввода такого вигглера в рабочее состояние. Во избежание вымерзания молекул остаточного газа на стенках холодной камеры вигглера необходимо перед началом охлаждения получить вакуум в камере пучка не менее, чем 10⁻⁵ мбар.

Первое включение вигтлера ELETTRA с модернизированным лайнером без откачных щелей показало, что причина экстремального выделения тепла в лайнере была диагностирована правильно и проблема заключалась именно в наличие откачных отверстий. Общий расход гелия практически перестал зависеть от тока пучка и стабилизировался на уровне ~0.5 л/ч, как показано на Рисунке 286. Отсюда же можно заметить, что вклад в нагрев гелия от электронного пучка составляет всего ~0.07 Вт, что соответствует испарению ~0.1 л/ч, что, кстати, уже хорошо стыкуется с предсказаниями расчётов, приведёнными в Таблица 5.4.



Рисунок 286. Зависимость расхода гелия вигглера ELETTRA от тока пучка после удаление откачных щелей.

Следующим стоял вопрос о хорошей теплоизоляции лайнера от гелиевой камеры. Что касается механизма теплообмена между ними, то, принимая во внимание то, что при температуре лайнера и холодной камеры всего 12 К и 4.2 К, соответственно, лучистый теплообмен между ними полностью исключается. То же касается и теплообмена через остаточный газ, так как лайнер находится сверхвысоком вакууме накопителя. Поэтому единственно возможным механизмом остаётся теплопередача через элементы крепления. Было испытано несколько различных способов дистанцирования лайнера от камеры гелиевого сосуда, что было нетривиальной задачей, принимая во внимание, что требуемый зазор составлял всего 0.6 – 0.8 мм на длине 2 м. При этом нужно было иметь ввиду, что кроме низкой теплопроводности, материал проставок должен был работать в условиях криогенных температур, высокой радиации и сверхвысокого вакуума. Были сделаны попытки использовать навитую спиралью проволоку из нержавеющей стали, как показано на Рисунке 287, нейлоновую леску с навязанными на ней узлами в качестве точечных контактов (см. Рисунок 288), колесики, изготовленные из материала РЕЕК (полиэфиркетон), как на Рисунке 289. Однако самым удачным решением можно считать шарики из материала ULTEM-2100, имеющего экстремально низкую теплопроводность и хорошую радиационную стойкость. На Рисунке 290 показаны элементы крепления лайнера из этого материала на одном из лайнеров.



Рисунок 287. Спираль из нержавеющей проволоки.



Рисунок 288. Нейлоновая леска с узлами.


Рисунок 289. Колёсико из РЕЕК.

Рисунок 290. Шарик из ULTEM2100.

Таким образом, удалив тёплую вакуумную камеру, из магнитного зазора, удалось получить выигрыш по уровню магнитного поля, оставив при этом расход гелия на приемлемом уровне, не превышающем расход с тёплой вакуумной камерой. При этом чистый вклад лайнера в общий расход гелия не превышает 0.07 Вт.

Для изучения предельной тепловой нагрузки, которую может отводить лайнер при защите гелиевого сосуда, был проведён эксперимент, в котором на вигглере ALBA [140] в рабочем режиме с пониженным давлением и с максимальным уровнем магнитного поля 2.1 Тл были включены для имитации нагрева электронным пучком специально размещённые на лайнере нагреватели. Как можно заметить из Рисунка 291, непрерывное падение давления в гелиевом сосуде со скоростью ~4 мбар/ч на уровне ~0.5 бар при подаче на лайнер мощности ~20 Вт замедлилось. Тем не менее, даже при долговременной дополнительной тепловой нагрузке в течение ~15 часов, которая по оценкам вдвое превышает величину реальной нагрузки от пучка, падение давления продолжилось, хотя и с меньшей скоростью. При этом температуры на вторых ступенях криокулеров, охлаждающих лайнер поднялись с 9.8 К до 15.9 К, что, судя по нагрузочным кривым на Рисунке 137, соответствует повышению отводимой мощности на ~ 8 Вт на каждом криокулере и общей дополнительной нагрузке ~ 16 Вт. Эта мощность неплохо согласуется с мощностью используемых нагревателей. Проведённый эксперимент показал, что криогенная система вигглера имеет большой запас холодильной мощности, значительно вигглера при работе на накопителе с непрерывно повышающий надёжность циркулирующим пучком.



Рисунок 291. Поведение давления в гелиевом сосуде и температуры лайнера при тепловой нагрузке ~20 Вт на лайнер.

5.4. Проблема механической устойчивости лайнера

процессе Опыт использования лайнеров потери показал, что В сверхпроводимости в некоторых многополюсных вигглерах возникало такое сочетание факторов, которое приводило к сильным механическим деформациям стенок лайнера под действием сил, возникающим при резком сбросе магнитного поля. Причём величина остаточной деформации была настолько сильной, что уже после нескольких переходов в нормальное состояние стенки лайнера почти полностью перекрывали апертуру, необходимую для пролёта электронного пучка накопителя. Именно такая ситуация впервые произошла, например, на вигглере с полем 7.5 Тл, установленном на накопителе Сибирь-2, когда из начальных 14 мм вертикальной апертуры за несколько переходов в нормальное состояние осталось только 8 мм. Внешний вид лайнера, деформированного в процессе потери сверхпроводимости представлен на Рисунке 292. Естественно, что такая аварийная

ситуация потребовала срочной остановки работы накопителя для удаления вигглера с кольца и поиска пути решения этой проблемы.



Рисунок 292. Внешний вид лайнера вигглера Сибирь-2, деформированного в процессе потери сверхпроводимости.

Было сделано предположение, что резкое затухание величины магнитного поля при переходе в нормальное состояние наводит вихревые токи на разных участках лайнера, которые, согласно закону Ампера, взаимодействуют, как друг с другом, так и с токами в обмотках магнита, что приводит к возникновению сил в вертикальном направлении, деформирующих лайнер. Причём, как можно заключить из Рисунка 292, форма и расположение деформированных участков хорошо совпадает с расположением полюсов магнита.

Для исследования этого процесса были проведены модельные эксперименты, в которых реальный медный лайнер, извлечённый из магнитного зазора вигглера Сибирь-2, был помещён для проведения быстрых динамических измерений перемещения стенки лайнера в процессе потери сверхпроводимости в короткий прототип магнита, изготовленного для накопителя LSU CAMD (описанного в Главе 3.1.3) и испытан в погружном гелиевом криостате. Нужно отметить, что в процессе проектирования вигглера LSU CAMD с большим уровнем поля 7.5 Тл и высокой запасённой энергией 850 кДж, имеющего при этом широкий поперечный размер 200 мм, заранее предполагалась проблема с механической устойчивости лайнера, так как эти параметры являлись ещё более жёсткими, чем у вигглера для Сибирь-2. Поэтому требовалось предварительное изучение поведения лайнера внутри такого магнита для правильного технического решения в выборе его конкретной геометрии.

В качестве датчиков для измерения положения стенки лайнера была использована система, состоящая из большого числа конденсаторов с изменяемым зазором, в которой первой обкладкой, общей для всех конденсаторов, являлась сама измеряемая стенка лайнера, а другие обкладки были выполнены на печатной плате и были равномерно распределены вдоль измеряемой стенки лайнера. Методика этого эксперимента, а также электронные тракты для быстрого измерения и обработки сигналов с конденсаторов была предложены и разработаны авторами работы [84]. На Рисунке 293 представлен внешний вид измерительной системы, установленной на прототипе магнита. Измерения показали, что, так как каждый раз первыми переходили в нормальное состояние разные катушки, то картина смещения стенки лайнера каждый различалась возле каждого полюса. Однако можно было сделать общий вывод, что сначала стенка лайнера притягивалась в сторону обмотки, а затем, по мере спадания поля в обмотках, начинали тянуться к центру лайнера. Таким, образом, смещения, которые превышали по величине предел упругости меди, приводили к локальной остаточной деформации лайнера напротив соответствующих полюсов магнита, что и можно было наблюдать на Рисунке 294.





Рисунок 293. Система измерения деформация лайнера при сборке на прототипе магнита с полем 7.5 Тл.

Рисунок 294. Форма деформаций на экспериментальном лайнере после серии переходов в нормальное состояние.

Надо отметить, что проблема деформации лайнера, в той или иной степени, уже проявляла себя на нескольких предыдущих вигглерах и с меньшим уровнем поля, созданных в ИЯФ СО РАН. И первый очевидный шаг для решения этой проблемы в виде увеличения толщины стенки лайнера уже был сделан ранее. Однако проверка показала, что такое техническое решение оказалось ошибочным, так как деформации при этом только усилились. Кроме того, было исследовано несколько вариантов защиты лайнера от деформации. Например, на тот же лайнер от вигглера Сибирь-2 было нанесено с помощью плазменного напыления керамическое покрытие толщиной 0.2 мм для увеличения механической жёсткости, как показано на Рисунке 295. Однако, проведённое динамическое измерение деформаций при потере сверхпроводимости показало, что амплитуда движения стенок лайнера и остаточная деформация уменьшилась незначительно. Следующий эксперимент был проведён с тем же лайнером после вырезания на его поверхности сквозных продольных пазов для прерывания наводимых токов, как показано на Рисунке 296. Причём, щели были герметично запаяны свинцово-оловянным припоем, имеющим довольно высокое электрическое сопротивление при криогенных температурах. Такой подход также не решил проблему деформации, причём в обоих случаях, как керамическое покрытие, так и запаянный в щели припой отслаивались от меди в процессе потери магнитом сверхпроводимости.



Рисунок 295. Медный лайнер с керамическим покрытием, нанесённым плазменным напылением.



Рисунок 296. Медный лайнер с продольными разрезами для прерывания наведённых поперечных токов.

Опираясь на этот отрицательный опыт, было предложено использовать для защиты лайнера от деформаций одновременно несколько технических решений, причём некоторые из них были весьма неочевидны:

1. С одной стороны, для увеличения жёсткости медного лайнера, прежде всего, толщину его стенки. Однако, как уже напрашивается вывод увеличить упоминалось, при этом увеличивается и сечение меди, находящейся в спадающем магнитном поле и, следовательно, возрастает электрическая проводимость и величина вихревых токов, наводимых в стенке лайнера и приводящих к ещё большим деформациям. Поэтому толщина стенки была выбрана наоборот, минимально возможной. Она ограничивалась только технологией изготовления и составила 0.5 мм в самом тонком месте широкой 200 мм камеры. Дополнительным преимуществом такого решения является, по-видимому, и то, что у тонкой стенки возрастает допустимая величина упругих деформаций по сравнению с толстой стенкой, так как жёсткость камеры растёт как толщина стенки в кубе. Поэтому форма лайнера после упругих отклонений во время перехода магнита в нормальное должна была состояние возвращаться к своей первоначальной форме без деформаций.

2. Далее, так как основное назначение лайнера – это перехват тепла и отвод его от сосуда с жидким гелием, то очевидно, что материал лайнера должен иметь для этого как можно большую теплопроводность при криогенных температурах. Однако высокая теплопроводность материала K одновременно приводит и к высокой электропроводности σ при одинаковой температуре T, соответственно закону Видемана-Франца:

$$\frac{K}{\sigma} = LT,\tag{5.17}$$

где $L = 2.47 \cdot 10^{-8} [BTOM/k^2]$ – число Лоренца.

Следовательно, с одной стороны, напрашивается вывод изготовить лайнер из бескислородной меди с хорошей теплопроводностью и относительным остаточным сопротивлением RRR, не менее, чем, 100. Однако это будет увеличивать также и величину наводимых токов, приводящих к деформации лайнера. Поэтому для снижения наводимых токов в качестве материала лайнера была специально выбрана медь с низким значение RRR, равным 50, которую обычно не принято применять для охлаждения элементов криогенных устройств. Тем не менее, в рабочем диапазоне температур лайнера (от 8К до 12К) теплопроводность её ещё достаточно велика для отвода тепла, но электропроводность при этом уже в два раза ниже.

Для дополнительного увеличения устойчивости к деформациям форма сечения 3. лайнера была выбрана в виде наложение двух контуров. Сечение лайнера для пролёта электронного пучка представляет собой эллипс с одинаковыми по всей длине лайнера осями 15 мм по вертикали и 80 мм по горизонтали. Форма же отверстия для вывода пучка синхротронного излучения представляет собой плоский раструб, расходящийся к выходу вигглера на необходимую ширину 200 мм. Внутреннее строение лайнера с конусным расширением, предназначенным для безопасного вывода излучения и минимизации ослабления жёсткости показано на Рисунке 297. Таким образом, была значительно уменьшена площадь участков вдоль лайнера с широкой горизонтальной апертурой, потенциально подверженных деформации. Кроме того, для повышения механической устойчивости участков с широкой апертурой были использованы вставные плоские пружинные элементы из нержавеющей стали. Внешний вид половинки лайнера с пружинными элементами в процессе сборки показан на Рисунке 298, а вид собранного лайнера, установленного в вакуумную камеру гелиевого сосуда со стороны входа и выхода пучка представлен на Рисунке 299 и Рисунке 300, соответственно.



Рисунок 297. Внутреннее строение лайнера. Конусное расширение предназначено для безопасного вывод излучения и минимизации ослабления жёсткости.



Рисунок 298. Внешний вид упругих элементов для защиты лайнера от деформации.



Рисунок 299. Лайнер, вставленный в гелиевый сосуд (на входе в вигглер).



Рисунок 300. Лайнер с пружинными элементами, установленный в вакуумной камере гелиевого сосуда (на выходе из вигглера).

4. В качестве дополнительной меры для уменьшения вероятности деформации была также произведена коррекция параметров шунтов, выполняющих функцию защиты обмоток сверхпроводящего магнита при потере сверхпроводимости. Выбор величины сопротивления этих шунтов R определяется компромиссом между временем затухания тока и напряжением на обмотках. С одной стороны, величина сопротивления R должна быть достаточно большой, чтобы не увеличивать время затухания $\tau \sim L/R$ во избежание расплавления провода в месте первоначального

появления нормальной зоны. С другой стороны, увеличение сопротивления R приводит к росту напряжения, равного $U \sim IR$, повышающего вероятность электрического пробоя обмоток. В данном случае для повышения устойчивости лайнера величина сопротивления R была выбрана минимально возможной для растягивания времени затухания и уменьшения величины токов, наводимых в стенках лайнера, которые определяются ЭДС \mathcal{E} , зависящей от скорости изменения магнитного потока Φ : $\mathcal{E} = - d\Phi/dt$. В этом случае при увеличении длительности затухания тока повышался риск перегорания обмоток, однако многочисленные переходы в нормальное состояние показали, что параметры защиты обмоток были выбраны оптимально.

Таким образом, проблему деформаций удалось решить и лайнер, изготовленный с применением вышеперечисленных технических решений, показал хорошую механическую устойчивость. Выдержав несколько десятков переходов в нормальное состояние без сколько-нибудь заметных остаточных деформаций, в настоящее время этот вигглер успешно работает на накопителе LSU-CAMD для генерации синхротронного излучения. Такой же подход был использован и при проектировании параметров лайнеров для всех последующих многополюсных вигглеров.

Выводы к Главе 5:

1. Была предложена и реализована новая концепция защиты гелиевого сосуда от теплового воздействия со стороны электронного пучка с использованием лайнера - негерметичной медной камеры, вставляемой внутрь гелиевой камеры и охлаждаемой ступенями криокулеров до температур ниже 10 К, которая, в отличие от традиционно используемых медных экранов, охлаждаемых жидким азотом, полностью исключает теплоприток в гелий через излучение и тепловые контакты. При этом экспериментально подтверждённый вклад в нагрев гелия от электронного пучка в рабочем режиме не превышает ~0.07 Вт, что соответствует испарению ~0.1л/ч;

2. Было впервые предложено и продемонстрировано, что отдельно охлаждаемый криокулерами лайнер, в отличие от также традиционно используемого гальванического медного покрытия, наносимого на 4 К гелиевую камеру, позволил полностью отвести тепловую нагрузку от гелиевого сосуда со стороны электронного пучка и синхротронного излучения;

3. Было впервые предложено и реализовано техническое решение, позволяющее защитить медный лайнер ОТ механических деформаций co стороны пондеромоторных сил, возникающих при резком уменьшении магнитного потока, при потере сверхпроводимости в магните. Идея состоит одновременном уменьшении наводимых на лайнере токов за счёт использования меди с пониженной электропроводностью (RRR<50), изготовлении лайнера с минимальной толщиной стенок на грани технологического предела (0.5 мм), а также в использовании специального пружинного элемента, возвращающего стенки лайнера В первоначальное положение после перехода магнита в нормальное состояние;

4. Минимизирование толщин стенок камер и зазоров до технологического предела позволило минимизировать и магнитный зазор для получения максимального уровня магнитного поля.

Глава 6

Прогноз развития сверхпроводящих многополюсных вставных устройств

Основным результатом данной диссертационной работы можно считать создание нового класса вставных устройств – многополюсных сверхпроводящих вигглеров, работающих криостатах с жидким гелием, предназначенных для генерации синхротронного излучения при работе на накопителях заряженных частиц, полная сводная таблица параметров которых представлена в Приложении А. Были созданы криогенные системы сверхпроводящих вигглеров автономно работающие в течение нескольких лет с нулевым расходом гелия и пониженным давлением в гелиевом сосуде, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку от электронного пучка и вводимого тока для запитки магнита величиной до ~1000 А. На Рисунке 301 магнитные параметры этих вигглеров условно представлены точками на графике зависимости магнитного поля вигглера от отношения зазора к периоду. Условная кривая, полученная эмпирическим путём и позволяющая оценить максимальное магнитное поля в вигглере в зависимости от соотношения магнитного зазора и периода, даётся выражением [145]:

$$B[T\pi] = 12.4 \cdot e^{\left[-\pi \frac{g}{\lambda_0} - 2.2\left(\frac{g}{\lambda_0}\right)^2\right]}$$
(6.1)

Эта эмпирическая формула верна при зазорах $g \approx 8 - 40$ мм и периоде $\lambda_0 \approx 10 - 100$ мм. Близость рабочих точек к условной кривой характеризует «предельность» параметров максимально достигнутого магнитного поля в этих устройствах с точки зрения эффективности использования свойств существующего в настоящее время сверхпроводящего Nb-Ti сверхпроводника. Можно отметить близость большинства из них к этой «предельной» кривой во всем востребованном диапазоне магнитных полей. Для сравнения отдельной точкой показаны параметры первого в мире сверхпроводящего многополюсного вигглера, созданного в ИЯФ СО РАН в 1978 году [20], которые были ещё далеки от оптимальных.



Рисунок 301. Зависимость максимального уровня магнитного поля, полученного в вигглерах, созданных в ИЯФ СО РАН, от параметра отношения зазора к периоду [145].

Можно утверждать, конструкция описываемых данной что, в диссертационной работе многополюсных сверхпроводящих вставных устройств была оптимизирована практически по всем направлениям для получения предельных параметров: во-первых, с точки зрения конструкции магнитной эффективного использования свойств доступных на системы для максимально сегодняшний день сверхпроводящих проводов, а во-вторых, для максимально производительного использования холодильной мощности доступных криокулеров, обеспечивающих не только нулевой расход жидкого гелия, но и пониженное относительно атмосферного давление в криостате [146]. Поэтому можно предположить, что, то дальнейший прогресс в этой области мог бы идти, скорее всего, в сторону развития полностью безжидкостных криогенных систем. В этом случае появляется возможность устранить из межполюсного магнитного зазора

такой элемент как вакуумная камера сосуда с жидким гелием и, таким образом, ещё уменьшив магнитный зазор, значительно увеличить магнитное поле на орбите пучка. При этом сама магнитная система должна находиться в вакуумном объёме криостата и охлаждаться только с помощью тепловых контактов с головками криокулеров. В принципе, такое охлаждение бы обеспечиваться, как могло непосредственным механическим контактом с использованием теплопровода с высокой теплопроводностью, так и через контакт с системой трубопроводов с циркулирующим внутри жидким гелием. Источником жидкого гелия, циркулирующего в трубках, может быть замкнутый гелиевый сосуд небольшого объёма, в котором реконденсация испарённого гелия производилась бы вторыми ступенями криокулеров с температурой 4К. Такая концепция построения криогенной системы позволила бы не только увеличить уровень магнитного поля за счёт уменьшения магнитного зазора, но и радикально упростить эксплуатация такого криогенного устройства.

Особенно привлекательно было бы вообще отказаться от использования жидкого гелия в криогенной системе, используя для отбора тепла от магнита систему тепловых трубок, соединяющих магнит со ступенями криокулеров. Эксперименты с использованием такой системы с азотным заполнением для ускорения предварительного охлаждения магнита уже были успешно проведены в ИЯФ СО РАН и результаты были опубликованы в работе [157]. Преимущество использования этой системы состоит не только в том, что тонкая и длинная азотная тепловая трубка создаёт такой же отток тепла с магнита, как громоздкий медный тепловод большого сечения. Азотная тепловая трубка работает в режиме теплового ключа, автоматически разрывающего связь со второй 60 К ступенью криокулера после достижения температуры замерзания жидкого азота 64 К, иначе криокулер станет уже нагревать магнит с более низкой температурой.

Исследования в направлении создания вставных устройств на основе безжидкостных криогенных систем уже активно ведутся в настоящее время в ИЯФ СО РАН. В результате этой деятельности был создан, успешно испытан и установлен для дальнейших исследований на источнике синхротронного излучения АNKA-KIT (Карлсруэ, Германия) 72-полюсный сверхпроводящий «сухой» вигглер с магнитным полем 3 Тл и периодом 50 мм. В магнитном зазоре этого вигглера находится единственная вакуумная камера, изготовленная из меди, одновременно лайнера. Камера играющая роль охлаждается медными тепловодами расположенными, благодаря появившейся теперь механической доступности, вдоль всей длины камеры и отводящими тепло на головку криокулера с температурой 20 К. Магнитный зазор при этом составляет всего 18 мм, а зазор для пучка равен 13 мм. Время захолаживания магнитной системы до рабочих температур составляет 5 дней. Основные характеристики и особенности конструкции магнитной и криогенной систем этого вигглера представлены в работах [143, 153, 154, и 156]. Дальнейшим исследованиям в этом перспективном направлении уделяется в ИЯФ СО РАН в настоящее время повышенное внимание. Например, ещё одним сверхпроводящим устройством, предполагающим работу с применением косвенного охлаждения, является сверхпроводящий соленоид для сверхбыстрой спектроскопии в террагерцовом диапазоне, проект которого был представлен в работе [155]

Другим важным направлением в развитии сверхпроводящих вставных устройств можно считать переход от магнитных структур в виде многополюсных вигглеров к созданию сверхпроводящих ондуляторов. Использование когерентных источников излучения позволяет максимально эффективно перераспределять мощность излучения и, вместо генерации излучения в широком спектре с последующим вырезанием необходимой части генерируемого излучения, позволяет использовать поток фотонов с высокой интенсивностью на интересующих исследователей гармониках. Для удовлетворения требованиям по спектральным характеристикам ондулятора необходимо достигнуть максимальной величины магнитного поля при минимальном периоде магнитной структуры, так чтобы при этом коэффициент ондуляторности оставался К~1. При этом сверхпроводящие электромагнитные ондуляторы имеют здесь очевидное преимущество перед традиционными ондуляторами на постоянных магнитах по величине магнитного поля. Несомненно, что для достижения максимальной величины магнитного поля в ондуляторе за счёт уменьшения магнитного зазора, было бы выгодно использовать именно «сухие» криомагнитные системы, к созданию которых в настоящее время прилагаются большие усилия во всем мире (например, см. работы [58], [59] и [60]).

Поэтому следующим логическим шагом являлось бы создание сверхпроводящих ондуляторов на основе безгелиевых криогенных технологий. «Сухой» 13-полюсный прототип такого ондулятора с пиковым магнитным полем 1.2 Тл и периодом 15.6 мм при магнитном зазоре 8 мм, уже был создан в ИЯФ СО РАН, успешно испытан в 2016 году и в настоящее время проводится дальнейшее совершенствование его конструкции. Первые результаты этой деятельности были изложены в работе [**158**].

Таким образом, предположить, что наиболее можно вероятным направлением развития сверхпроводящих многополюсных вставных устройств для генерации синхротронного излучения может стать именно развитие сверхпроводящих ондуляторов на основе криостатов с косвенным охлаждением. Положение этих устройств относительно других многополюсных сверхпроводящих вигглеров выделено отдельной областью на Рисунке 301.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Создан новый класс вставных устройств – сверхпроводящие многополюсные синхротронного излучения. вигглеры ДЛЯ генерации Было разработано И более десятка уникальных сверхпроводящих вставных устройств с реализовано рекордными параметрами, как по величине магнитного поля, так и по минимальному потреблению жидкого гелия, не имеющих аналогов в мире. Спектральные характеристики излучения, генерируемого этими устройствами, перекрыли весь востребованный пользователями диапазон по энергиям квантов и успешно используются для решения исследовательских задач с помощью синхротронного излучения во многих крупнейших зарубежных и российских научных центрах: LSU-CAMD (США), BESSY-II (Германия), ELETTRA (Италия), CLS (Канада), DLS (Англия), LNLS (Бразилия), ALBA (Испания), AS (Австралия), ANKA (Германия) и КИСИ (Москва). Стало общепризнанным, что ИЯФ СО РАН занимает лидирующие позиции в создании сверхпроводящих многополюсных вигглеров;

2. Предложена и впервые реализована новая концепция конструирования криостатов для сверхпроводящих магнитов на основе криокулеров, позволившая повысить эффективность использования мощности холодильных ступеней до уровня, не только снижающего расход жидкого гелия до нуля, но и создающего пониженное относительно атмосферного давление в криогенном сосуде с соответствующим понижением температуры кипения жидкого гелия вплоть до ~3 К. Новый подход заключается в использовании холодильных ступеней криокулеров не для реконденсации уже испарённого гелия, полного только но И для предотвращения его испарения путём последовательного перехвата всех каналов притока тепла ступени криокулеров с соответствующими температурами. на Понижение рабочей температуры позволило также увеличить величину магнитного поля, благодаря сдвигу токовой характеристики сверхпроводящего провода и, тем самым повысить надёжность. На основе этого принципа было создано семейство криогенных вставных устройств, способных долговременно (в течение нескольких

лет) автономно работать на ускорителях заряженных частиц в условиях ограниченного доступа без потребления жидкого гелия, несмотря на дополнительную тепловую нагрузку, создаваемую электронным пучком и вводимый ток для запитки магнита величиной около 1000 А, что никем в мире ещё не было продемонстрировано;

3. Предложена и разработана универсальная методика оптимизации параметров сверхпроводящих многополюсных вигглеров для получения требуемых спектральных и мощностных характеристик синхротронного излучения на основе подбора величины периода и магнитного поля на орбите при определённом магнитном зазоре и одновременном достижении максимально возможного уровня магнитного поля на обмотке, определяемого техническим пределом – током короткого образца сверхпроводящего провода. Данная методика позволила оптимизировать каждое из вставных устройств под свою специфическую пользовательскую задачу с учётом конкретных особенностей данного накопителя и требований к спектру и мощности генерируемого излучения;

4. На большинстве из созданных многополюсных вигглеров был продемонстрирован реальный ток в обмотках величиной не менее, чем 90-95% от теоретического предела (тока короткого образца), что является рекордными параметрами для обмоток типа рейстрек и позволяет говорить о создании технологии стабильного изготовления сверхпроводящих вигглеров с большим количеством обмоток и предельно возможным уровнем магнитного поля на каждой из обмоток;

5. Обоснованы и продемонстрированы преимущества схемы расположения сверхпроводящего одиночных обмоток многополюсного вигглера В виде горизонтального рейстрека по сравнению с конструкцией типа вертикальный рейстрек для вигглеров с малым периодом и ондуляторов. В частности, показана экономическая целесообразность именно такой конструкции при необходимости замены отдельных неисправных обмоток, что особенно важно при массовом изготовлении вигглеров (например, при создании затухательных колец, используемых для уменьшения эмиттанса пучка);

6. Предложен и впервые создан конструктивный элемент криостата - медный эффективной лайнер, предназначенный ДЛЯ защиты жидкого гелия И сверхпроводящих обмоток от нагрева со стороны электронного пучка ускорителя и обладающий устойчивостью к механическим деформациям, вызванным электромагнитными силами при выходе магнита из сверхпроводящего состояния. Изучены особенности лайнеров различной конструкции И выявлены конструктивные ограничения, приводящие к возможным неисправностям в работе вигглера. Выработаны практические рекомендации, которые можно применять при конструировании лайнеров для различных вставных устройств;

7. Предложены и впервые реализованы схемы подключения обмоток многополюсных вигглеров (в том числе и секционированных) с разделёнными токами, которые не только обеспечивают оптимальную запитку обмоток для достижения максимального уровня поля, но и позволяют настраивать интегралы магнитного поля для замыкания орбиты пучка без использования дополнительных источников тока и, соответственно, не увеличивая теплоприток в гелий от дополнительных токовводов;

8. Предложено и реализовано использование теплоёмких добавок в эпоксидный компаунд основе гадолиния для повышения устойчивость обмоток на многополюсных вигглеров сверхпроводящего к выходу ИЗ состояния, спровоцированного локальными сбросами электронного пучка накопителя при инжекции;

9. Обоснованы и реализованы системы защиты сверхпроводящих обмоток многополюсных вигглеров, основанные на цепочках холодных диодов и резисторов, надёжно защищающих обмотки от разрушения при выходе из сверхпроводящего состояния и обеспечивающие регистрацию перехода в нормально-проводящее состояние, исключающую ложные срабатывания.

Таким образом, можно утверждать, что была достигнута основная цель данной диссертационной работы И В результате комплексных расчётных И экспериментальных исследований была решена крупная научная проблема: создан новый класс вставных устройств - многополюсные сверхпроводящие вигглеры, предназначенные для генерации синхротронного излучения В широком

спектральном диапазоне (вплоть до 200 КэВ) и не ухудшающие качество пучка при установке их на накопитель. Также были созданы уникальные криогенные системы повышенной надёжности на основе криокулеров, автономно работающие в условиях ограниченного доступа в течение нескольких лет не только с нулевым расходом жидкого гелия, но и с пониженным давлением в гелиевом сосуде, несмотря на дополнительную тепловую и радиационную нагрузку от электронного пучка накопителя и вводимый ток для запитки магнита величиной около 1000 А.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному консультанту Н.А.Мезенцеву за постоянную поддержку, ценные дискуссии и создание творческой атмосферы в работе, С.В. Хрущеву, В.М. Цуканову, А.А. Волкову, за ценные дискуссии, дружеское участие и постоянную поддержку, В.М. Сыроватину и В.Х. Льву за творческий подход и высокий профессионализм при конструировании различных систем вигглеров, В.В. Репкову, А.М. Батракову и Г.В. Карпову за высокий профессионализм и мастерство при создании систем управления и контроля, Е.Г. Мигинской и О.А.Тарасенко за высокий профессионализм в создании программного обеспечения, С.П.Демину, И.Б.Гургуце, Ю.А.Тойкичеву, В.С.Казакову и С.Т.Скоропупову А.И.Поздееву, за надежное техническое обеспечение работы и дружеское участие. Коллективу экспериментального производства ИЯФ - за воплощение наших идей в реальные устройства. Коллективу криогенной станции ИЯФ за бесперебойное обеспечение многочисленных экспериментов Отдельно бы поблагодарить жидким гелием. хотелось О.Н.Бобровникову за помощь в подготовке диссертационных документов.

Кроме того, автор особо благодарен тем иностранным заказчикам, и особенно Д.Кремеру (D.Kraemer) и Й.Схоутену (J.Schouten), которые, осознавая возможный технический и финансовый риски, соглашались на воплощения нами таких технических решений, которые до этого ещё никем не были продемонстрированы на реальных устройствах. И вдвойне автор благодарен тем заказчикам, которые проявляли лояльность и давали возможность для исправления тех подходов, которые не срабатывали с первого, а то и со второго раза.

Автор сердечно благодарен Ольге Шкаруба, создавшей необходимые условия для написания этой работы.

Приложение А

Таблица А.1. Основные параметры сверхпроводящих многополюсных вигглеров, созданных в ИЯФ СО РАН.

Источник СИ,	Год	Магнитное		Колич.	Период,	Зазор	Апертура	Длина	Параметр	Запас	Мощн.	Расход
Расположение,		поле, Тл		полюсов	MM	магнитн.,	верт., мм	магнита,	К	энергии,	излучен,	гелия, л/ч
(Е, ГэВ/I, А)		Проект	Макс.			MM	_	ММ		кДж	кВт	
BESSY-II,(1.9/0.5)	2002	7.0	7.67	13+4	148	19	13	1360	97	450	56	0.5
(Германия)												
ELETTRA,(2.0/0.2)	2002	3.5	3.6	45+4	64	16.5	10.5	1680	21	240	8.8	0.45
(Италия)												
CLS, (2.9/0.5)	2005	2.0	2.2	61+3	34	13.5	9.5	1120	6.5	15	12	< 0.03
(Канада)												
DLS, (3.0/0.5)	2006	3.5	3.75	45+4	60	16.4	10	1544	19.6	70	50	< 0.03
(Англия)												
Сибирь-2, (2.5/0.1)	2007	7.5	7.7	19+2	164	19	14	1836	115	500	36	< 0.03
(Москва)												
CLS, (2.9/0.5)	2007	4.2	4.34	25+2	48	14.5	10	1000	19	20	28	< 0.03
(Канада)												
DLS, (3.0/0.5)	2009	4.2	4.25	45+4	48	13.8	10	1304	18.8	25	55	< 0.03
(Англия)												
LNLS, (1.37/0.3)	2009	4.1	4.19	31+4	60	18.4	14	1162	23	60	5	< 0.03
(Бразилия)												
ALBA-CELLS	2010	2.1	2.27	117+2	30	12.6	8.5	1892	6	19	20	< 0.01
(Испания),(3.0/0.4)												
AS, (3.0/0.2)	2012	4.2	4.5	59+4	50.5	15.2	10	1758	18.8	70	35	<0 (0.7 бар)
(Австралия)												
CAMD-LSU	2013	7.5	7.75	11+4	193.4	25.2	15	1594	136	850	17	<0 (0.5 бар)
(CIIIA),(1.3/0.2)												_
ANKA-CATACT	2013	2.5	2.85	36+4	47	19	15	1082	12	30	4.5	<0 (0.3 бар)
(Германия).(2.5/0.2)												-

Литература

- J.A.Clarke: The science and technology of undulators and wigglers. (Oxford Series on Synchrotron Radiation)/ Published by Oxford University Press (2016), 231p., (p.155-157).
- E.R. Moog and Y. Ivanyushenkov., "Developments in Superconducting Insertion Devices," Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, NY, USA., 2077 - 2081.
- Фетисов Г.В. Синхротронное излучение. Методы исследования структуры веществ. / под ред. Л.А. Асланова.-М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. -672с., (на стр. 129-130).
- Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н., Использование синхротронного излучения: состояние и перспективы // Успехи физических наук, Том 122, вып.3, с.369 – 418.
- **5.** J.Rossbach and Schmuser, CERN Accelerators School 5th General Accelerator Physics Course, CERN 94-01, p.17.
- 6. Кулипанов Г.Н. Изобретение В. Л. Гинзбургом ондуляторов и их роль в современных источниках синхротронного излучения и лазерах на свободных электронах // Успехи Физических Наук 2007 т.177 N 4 с. 384-393.
- 7. Гинзбург В.Л. // Изв.АН СССР. Сер.физ. 11(2), 165-181, 1947.
- **8.** Hans Motz, W. Thon, R.N. Whitehurst, Experiments on radiation by fast electron beams, Journal of Applied Physics, 24(7):826-833, 1953.
- **9.** Settimio Mobilio, Federico Boscherini, Carlo Meneghini. Synchrotron radiation. Basics, methods and applications. Springer Heidelberg New York, 2015.
- 10.P.Elleaume, Proc.1991 US Particle Accelerator Conference, IEEE 91CH3038-7, p.1083.
- 11.Gluskin E., Frachon D., Ivanov P., Maines J., Medvedko A., Trakhtenberg E., Turner L., Vasserman I., Erg G., Evtushenko Yu., Gavrilov N., Kulipanov G., Petrov S., Popik V., Vinokurov N., Friedman A., Krinsky S., Rakowsky G., Singh

O, The elleptical multipole wiggler project. Proceedings of the 1995 IEEE Particle Accelerator Conference, v.3, 1426–1428, 1996.

- 12. R.P.Walker, CERN Accelerator School 5th General Accelerator Physics Course, CERN 94-01, p.481.
- 13. J.M.Paterson, J.R.Rees and H.Wiedemann, SPEAR-186, PEP-125, July 1975.
- 14. K.W.Robinson, Phys.Rev.111(1958), 373.
- 15. A.Hofmann et al., Proc.6th Int. Conf. High Energy Accelerators, Cambridge, 1967, p.123.
- 16. H.G.Hereward, CERN AR/Int. SR/61-15 (1961).
- **17.** A.Hofmann, LEP Note 192 (1979).
- 18. J.M.Jowett, Proc.12th Int. Conf. High Energy Accelerators, Fermilab, August 1983, p.300.
- 19. A.A.Sokolov and I.M.Ternov, Synchrotron Radiation, (Pergamon Press, 1968).
- 20. Л.М.Барков, В.Б.Барышев, Г.Н.Кулипанов, Н.А.Мезенцев, В.Ф.Пиндюрин, А.Н.Скринский, В.М.Хорев. Проект использования «змейки» из сверхпроводящих магнитов для генерирования синхротронного излучения на накопителе ВЭПП-3. Препринт ИЯФ 78-13. Новосибирск, 1978.
- 21. A.S.Artamonov, L.M.Barkov, V.B.Baryshev, N.S.Bashtovoy, N.A.Vinokurov, E.S.Gluskin, G.A.Korniukhin, G.N.Kulipanov, N.A.Mezentsev, V.F.Pindiurin, A.N.Skrinsky and V.M.Khorev. First results of the work with a superconducting "snake" at the VEPP-3 storage ring. NIM, Vol.177(1980), p.239-246.
- **22.** R. Carr, W. Craddock, P. Emma, J. Welch, J. Weisend A superconducting wiggler for the LCLS." // SLAC-TN-02-003, p.1-31, 2002.
- 23.E.B. Blum, D.R. Lynch, P. Mortazavi, O.V. Singh, W. Thomlinson, M.H. Woodle, A.J. Broadbent, M.C. Coates, S.R. Milward, E.J.F. Moor, K.D. Smith. A superconducting wiggler magnet for the NSLS X-ray ring // Proc. Particle Acceleration Conference, Vancouver, Canada, vol.3, 1997, 3494 – 3496.
- 24. J.T.Eriksson, L.Kettunen, R.Mikkonen, L.Soderlund, A high field superconducting wiggler for MAX-lab at Lund, Sweden. IEEE Transactions on magnetics, vol.28, No.1, January 1992.

- **25.** John Ross, Kevin Smith. Design and manufacture of a 6-T wiggler magnet for the Daresbury SRS. Rev.Sci.Instrum.63(1), January 1992, p.309-312.
- 26. C.S.Hwang, B.Wang, B.Wahrer, C.Taylor, C.Chen, T.Juang, F.Y.Lin, J.C.Jan, C.H.Chang, H.H.Chen, M.H.Huang, K.T.Hsu, and G.Y.Hsiung. Design, construction, and performance testing of a 6.5 T superconducting wavelength shifter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 17, No. 2, p.1229-1234, 2007.
- **27.** Kazuhito Ohmi, Takashi Nogami, Yasuo Fukushima, Masahiro Katoh, Tatsuya Yamakawa, Characteristics of the five-pole superconducting vertical wiggler at the Photon Factory. Rev.Sci.Instrum.63(1), January 1992, p.301-304.
- **28.** M.Negrazus, A.Peters, SAW a superconducting asymmetric multipole wiggler at the DELTA storage ring. Proc.of EPAC-96.
- **29.**G. LeBlanc, E. Wallén, M. Eriksson. The max wiggler. Proceedings of PAC-2001, Chicago, 2001.
- 30. C.S.Hwang, C.H.Chang, H.P.Chang, J.R.Chen, H.H.Chen, J.Chen, W.S.Chiou, Y.C.Chien, T.C.Fan, C.C.Kuo, F.Y.Lin, H.C.Li, S.N.Hsu, K.T.Hsu, M.H.Huang, G.Y.Hsiung, F.Z.Hsiao. Status of a 3.2 T superconducting wiggler at NSRRC. Proceedings of Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI-2004), Grenoble, France, 2004.
- **31.** K. Wille., CERN Accelerators School. Synchrotron radiation and free electron lasers, CERN 98-04, p.61.
- **32.** K. Halbach, J. de Physique 44, Colloque C1, supplement to #2 (1983), C1.
- 33. Тернов И.М., Синхротронное излучение // Успехи физических наук, 1995, Том 165, вып.4, с.429 – 256.
- **34.** R.Walker. Bending magnet and wiggler radiation. in "Undulators, Wigglers and their Applications", Edited by Hideo Onuki and Pascal Elleaume. CRC Press, 2003, 108-147.
- **35.** A. Devred, Review of superconducting storage-ring dipole and quadrupole magnets, CERN Accelerators School General Accelerator Physics Course, 1997.
- 36. L. Bottura, A practical fit for the critical surface of NbTi, IEEE Trans. Appl. Sup., vol. 10, pp. 1054–1057, 2000.

- 37. Шиков А. К. Крупные проекты НТСП устройства. Становление ИТЭР в России // Сверхпроводники для электроэнергетики. 2012. Июль. 9, Вып. 3, с.1–9.
- 38. Воробьева А. Е., Шиков А. К., Потанина Л. В. И др. Разработка Nb3Sn и NbTi сверхпроводников для магнитной системы ИТЭР и создание промышленного производства // 1-я национальная конференция по прикладной сверхпроводимости. Москва, 6–8 декабря 2011 г. М., 2011.
- **39.**И.Л. Дерягина, Е.Н. Попова, Е.П. Романов. Разработка и создание промышленных сверхпроводников на основе Nb-Ti и Nb3Sn. // Вестн. Ом. унта. 2013. № 2. С. 57–65.
- **40.** D.C. Larbalestier and P.J. Lee, New development in niobium titanium superconductors, Proceedings of the 1995 IEEE Particle Accelerator Conference, IEEE catalogue 95CH35843: 1276–1281, 1996.
- **41.**L.T. Summers, M.W. Guinan, J.R. Miller and P.A. Hahn, A model for the prediction of Nb3Sn critical current as a function of field, temperature, strain and radiation damage, IEEE Trans. Magn., 27(2): 2041–2044, 1991.
- **42.** Сотников Д.В., Исследование токонесущих свойств перспективных высокотемпературных сверхпроводящих материалов для электротехнических устройств: диссертация кандидата технических наук: 05.09.02, ... Электротехнические материалы и изделия / ОАО «Всероссийский Научно-Исследовательский Проектно-Конструкторский и Технологический Институт Кабельной Промышленности», Москва, 2016, 126 с.
- **43.** D. Berger, V. Duerr, H. Krauser, S. Reul, M. Rose, E. Weihreter. Mechanical and thermal design of vacuum chambers for a 7 T multipole wiggler for BESSY II. // Proceedings of PAC 2002, Paris, France, p.2598-2600.
- 44. M.G. Fedurin, N.A. Mezentsev. Achievement of one-coordinate cross uniformity of magnetic field in central pole of strong field superconducting wiggler. //NIM A 448 (2000) 59–61.
- **45.**В.Б.Зенкевич, В.В.Сычев. Магнитные системы на сверхпроводниках, М., Наука, 1972.

- **46.**Dubrovin A., Simonov E., MERMAID, computer code for magnetic field computation. Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, (1993).
- **47.**Шварц Б. Металловедение и технология сверхпроводящих материалов. / Б. Шварц, С. Фонер; Пер. с англ. М.: Металлургия, 1987. 560с
- 48. Брехна Г., Сверхпроводящие магнитные системы, М., Мир, 1976.
- **49.**B.J. Maddock, G.B. James, "Protection and Stabilization of Large Superconducting Coils," Proc. IEE, 115 (4), 543, 1968.
- 50. М.Уилсон, Сверхпроводящие магниты // М., Мир, 1995.
- **51.** Ph.Lebrun, Cryogenic systems for accelerators.// Geneva: CERN.- 1995.
- 52. V. Korchuganov, A. Valentinov, N. Mezentsev. An influence of 7.5 T superconducting wiggler on beam parameters of Siberia-2 storage ring. Proceedings of RuPAC 2006, Novosibirsk, Russia, p.395 – 397.
- **53.** M. Fedurin, P. Jines, D. Launey, T. Miller, V. Suller, Y. Wang. Plans for a 2nd insertion device in CAMD. Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland.
- **54.** V.P. Suller, M. Fedurin, P. Jines, D. Launey, T. Miller and Y. Wang. A proposed multipole wiggler for CAMD. Proceedings of PAC-2007, Albuquerque, New Mexico, USA.
- 55. V.P. Suller, M. Fedurin, P. Jines, D. Launey, T. Miller, Y. Wang. The specification of a multipole wiggler for CAMD. //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 582 (2007) 51–53.
- **56.** V.P. Suller, P. Jines, D. Launey, T. Miller, S .Wang, Y. Wang. An optic with small vertical beta function for the CAMD light source. Proceedings of PAC-2009, Vancouver, Canada.
- **57.**Nikolaos Baimpas, Michael Drakopoulos, Thomas Connolley, b Xu Song, Costas Pandazaras and Alexander M. Korsunsky. A feasibility study of dynamic stress analysis inside a running internal combustion engine using synchrotron X-ray beams. Journal of Synchrotron Radiation , 2013, (20), 316–323.
- 58. Y.Ivanyushenkov, M.Abliz, C.Doose, J.Fuerst, Q.Hasse, M.Kasa, V.Lev, N.Mezentsev, V.Syrovatin, E.Trakhtenberg, V.Tsukanov, I.Vasserman and E. Gluskin. Development of a superconducting undulator for the APS. Journal of Physics 425 (2013), Proceedings of SRI-2012, 1-4.

- 59. S.Casalbuoni, T.Baumbach, S.Gerstl, A.Grau, M.Hagelstein, C.Heske, T.Holubek, D.Saez de Jauregui, C. Boffo, W.Walter. Status of the development of superconducting undulators at ANKA. Synchrotron Radiation News, May 2011, p.1-4.
- 60. J.A.Clarke, V.Bayliss, T.W.Bradshaw, S.A.Brown, A.J.Brummitt, G.W.Burton, S.J.Canfer, B.Green, S.E. ughes, E.C.Longhi, J.C.Schouten, B.J.A.Shepherd1, S.R. Watson. Status of the UK superconducting planar undulator project. Proceedings of IPAC-2013, Shanghai, China, 2259-2261.
- 61. D. Zangrando, L.Tosi, B. Diviacco, S. Di Mitri, C. Knapic. Commissioning of two new insertion devices at Elettra. Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. p. 1050 – 1052
- 62. W.A.Wurtz, L. O.Dallin, M. Jong, M.J.Sigrist and J.M.Vogt. Preventing superconducting wiggler quench during beam loss at the Canadian Light Source. Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany. p.1992-1994.
- **63.**Lock J.M., Cryogenics, 3, 171, 1963.
- **64.**В.Л.Бидерман. Теория механических колебаний: Учебник для вузов.-М., Высшая школа, 1980, 408 с.
- 65.Э.С.Зеленский, А.М.Куперман, Ю.А.Горбаткина, В.Г.Иванова-Мумжиева, А.А.Берлин. Армированные пластики современные конструкционные материалы. // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева, 2001, т. XLV, № 2, с.56-74.
- 66. Баженов С.Л., Берлин А.А., Мальков С.С., Рогозинский А.К. Аномальная зависимость модуля упругости арамидных волокон от деформации.// Высокомолекулярные соединения. Серия А, Механика полимеров. 2011, том 53, № 12, с. 2101-2105.
- **67.**L.Tosi, C.Knapic, D.Zangrando. The ELETTRA superconducting wiggler. // Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, p.390-392.
- 68. Y. Ivanyushenkov, K. Harkay, M. Abliz, L. Boon, M. Borland, D. Capatina, J. Collins, G. Decker, R. Dejus, J. Dooling, C. Doose, L. Emery, J. Fuerst, J. Gagliano, Q. Hasse, M. Jaski, M. Kasa, S. H. Kim, R. Kustom, J. C. Lang, J. Liu, E. Moog, D. Robinson, V. Sajaev, K. Schroeder, N. Sereno, Y. Shiroyanagi, D. Skiadopoulos, M.

Smith, X. Sun, E. Trakhtenberg, I. Vasserman, A. Vella, A. Xiao, J. Xu, A. Zholents, and E. Gluskin V. Lev, N. Mezentsev, V. Syrovatin, V. Tsukanov, A. Makarov, J. Pfotenhauer and D. Potratz. Development and operating experience of a short-period superconducting undulator at the Advanced Photon Source. // Physical Review special topics - Accelerators and Beams 18, 040703 (2015).

- 69. http://www.shicryogenics.com/products/.
- 70. E.A.Kuper, N.A.Mezentsev, E.G.Miginsky, V.V.Repkov, V.M.Tsukanov. Control system of the superconducting 63-pole 2-Tesla wiggler for Canadian Light Source. Problems of atomic science and technology. 2006. No. 3.Series: Nuclear Physics Investigations (47), p.157-159.
- 71. L. Pivetta, F. Giacuzzo, G. Scalamera, D. Vittor. Controls and interlocks for the new ELETTRA superconducting wiggler. Proc. 15th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS 2015), Melbourne, Australia, 2015.
- **72.** Hofmann A. CERN Accelerators School: Synchrotron radiation and free electron lasers. CERN, 1998-04, pp.1–30.
- **73.** A. B. Pippard, Proc. Roy. Soc. A191, 385 (1947).
- **74.** Э.А.Канер, В.Ф.Гантмахер. Аномальное проникновение электромагнитного поля в металл и радиочастотные размерные эффекты, // Успехи физических наук, т.92, вып.2, стр.193-241, 1968.
- **75.**Chou W, Ruggiero F. Anomalous skin effect and resistive wall heating. LHC Project Note 2, CERN, p.1-6, 1995.
- **76.** M. A. Green. Cryogenic Refrigeration Requirements for Superconducting Insertion Devices in a Light Source. Report Number: LBNL-53578, Berkeley, 2003.
- 77. M. Kohler, Zur magnetischen Widerstands anderung reiner Metalle, Ann. Physik 5 32 (1938) 211.
- 78. F. Caspers, M. Morvillo, F. Ruggiero, J. Tan. Surface resistance measurements and estimate of the beam-induced resistive wall heating of the LHC dipole beam screen. LHC Project Report 307, CERN, 1999.

- **79.** K. L. F. Bane and A. Novokhatskii, The Resonator impedance model of surface roughness applied to the LCLS parameters, Tech. Rep. SLAC-AP-117, SLAC, 1999.
- **80.**G. V. Stupakov. Surface Roughness Impedance. Tech. Rep. SLAC-PUB-8743, Stanford, 2000.
- **81.** E. Wallen and G. LeBlanc. Cryogenic system of the max-wiggler. Cryogenics, 44(12), p.879–893, 2004.
- **82.**Robert L. Gluckstern. Coupling impedance of many holes in a liner within a beam pipe. CERN Report SL/92-06-(AP).
- **83.**S. Casalbuoni. Beam heat load in superconducting wigglers. CERN Yellow Report CERN-2013-002, pp.73-78, 2013.
- 84. А. В. Зорин, Н. А. Мезенцев, В. М. Цуканов, Быстрое измерение деформации лайнера сверхпроводящего вигглера при переходе магнитов в нормальное состояние, Известия РАН. Серия Физическая, 2013, том 77, № 9, с. 1354–1358.
- 85. E. C. M. Rial and J. C. Schouten. Electron beam heating effects in superconducting wigglers at Diamond Light Source. Proceedings of IPAC-2010, Kyoto, Japan. p.3195-3197.
- **86.** J.C. Schouten and E.C.M. Rial. Electron beam heating and operation of the cryogenic undulator and superconducting wigglers at Diamond. Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain. 3323-3325.
- 87. M.Sigrist, L Dallin and W.A.Wurtz. Super-conducting wigglers and the effect on injection efficiency. Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, NY, USA. p.1259-1261.
- 88. W.A.Wurtz, L.O.Dallin, and M.J.Sigrist. Beam based measurements with superconducting wigglers at the Canadian Light Source with applications to nonlinear beam dynamics. Proceedings of IPAC-2012, New Orleans, Louisiana, USA.p.1599-1601.
- 89. T.W. Wysokinski, L.D.Chapman, D. Miller, G.Belev, L. Lin, A. Madison, W. Wurtz, L.Dallin. 25+2 poles, 4.3 T wiggler at BMIT 7 years operational experience. Proceedings of the 12th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation SRI-2015. p.020026-1 020026-4.

- 90. F.H. Cardoso, S.R. Marques, J. F. Citadini, X. R. Resende, R.M. Seraphim. Beam position interlock system for the LNLS 4 Tesla superconducting wiggler. Proceedings of IPAC-2010, Kyoto, Japan. p.2478-2480.
- **91.** V. E.Keilin, et al. Increasing thermomagnetic stability of composite superconductors with additives of extremely large heat capacity substances, Technical Physics Letters (2008), 34, pp. 418–420

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

- **92.** Kulipanov G.N., Mezentsev N.A., Morgunov L.G., Sadjaev V.V., Shkaruba V.A., Sukhanov S.V., Vobly P.D., Development of superconducting compact storage ring for technical purposes in the USSR. // Rev. Sci. Instrum. 63(1), 1992, p.731-736.
- 93. Grudiev A.V., Djurba V.K., Kulipanov G.N., Khlestov V.B., Mezentsev N.A., Ruvinsky S.I., Shkaruba V.A., Sukhanov S.V., Vobly P.D., Y.M.Koo, D.E.Kim and Y.U.Sohn, Superconducting 7.5 Tesla wiggler for PLS. // NIM, Vol. A359, No.1-2 (1995), p.101-106.
- 94. Borovikov V.M., Fedurin M.G., Mezentsev N.A., Shkaruba V.A., Sukhanov S.V. and Vobly P.D., Power supply and quench protection system for a superconducting 7.5 Tesla wiggler. // NIM Vol. A359, No.1-2 (1995), p.107-109.
- 95. Borovikov V.M., Djurba V.K., Fedurin M.G., Kulipanov G.N., Lee O.A., Mezentsev N.A., Shkaruba V.A., B.Craft, V.Saile, Proposal of superconducting 7 Tesla wiggler for LSU-CAMD. // NIM, Vol. A405, No.2,3 (1998), p.208-213.
- **96.** Bekhtenev E., Dementiev E., Fedurin M.G., Mezentsev N.A., Shkaruba V.A., Vobly P.D., Measurement of magnetic field characteristics of wigglers with the current strained wire method. // NIM, Vol. A405, No.2,3 (1998), p.214-219.
- 97. Borovikov V., Craft B., Fedurin M., Jurba V., Khlestov V., Kulipanov G., Li O., Mezentsev N., Sail V., Shkaruba V., Superconducting 7 Tesla wiggler for LSU CAMD. // Journal of Synchrotron Radiation (1998), Vol. 5, Part 3, p.440-442.

- 98. Borovikov V., Fedurin M., Kerginsky A., Kuzin M., Mezentsev N., Shkaruba V., Magnetic measurement system for high field magnets. // Journal of Synchrotron Radiation (1998), Vol. 5, Part 3, p.382-385.
- 99. Ando A., Datacute S., Fedurin M., Hara M., Kamitsubo H., Kiselev A., Kulipanov G., Kumagai N., Mezentsev N., Miyahara Y., Nakamura T., Ohkuma H., Shkaruba V., Skrinsky A., Soutome K., Takao M., Tanaka H., Proposal of the high magnetic field superconducting wiggler for slow positron source at SPring-8. // Journal of Synchrotron Radiation (1998), Vol. 5, Part 3, p.360-362.
- **100.** Fedurin M., Kulipanov G., Mezentsev N., Shkaruba V. Superconducting high-field three-pole wigglers in Budker INP. // NIM A 448 (2000), p.51-58.
- 101. A.Batrakov, I.Ilyin, G.Karpov, V.Kozak, M.Kuzin, E.Kuper, V.Mamkin, N.Mezentsev, V.Repkov, A.Selivanov and V.Shkaruba, Control and data acquisition systems for high field superconducting wigglers. Proc.of 7th International conference of Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin, 2000. // NIM A 467 (2001), p.202-205.
- 102. V.M.Borovikov, V.K.Djurba, M.G.Fedurin, V.V.Repkov, G.V.Karpov, G.N.Kulipanov, M.V.Kuzin, N.A.Mezentsev, V.A.Shkaruba, D.Kraemer, D.Richter Superconducting 7 Tesla Wave Length Shifter for BESSY-II. Proc.of 7th International conference of Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin, 2000. // NIM A 467 (2001), p.181-184.
- 103. A. Batrakov, V. Borovikov, E. Bekhtenev, M. Fedurin, M. Hara, G. Karpov, M.Kuzin, N. Mezentsev, V. Shkaruba, K. Soutome, K. Tzumaki, Magnetic measurements of the 10T Superconducting Wiggler for the SPring-8 storage ring. Proc.of 7th International conference of Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin, 2000. // NIM A 467 (2001), p.190-193.
- 104. V.M.Borovikov, M.G.Fedurin, G.V.Karpov, D.A.Korshunov, E.A.Kuper, V.Mamkin, A.S.Medvedko, N.A.Mezentsev, V.V.Repkov, V.A.Shkaruba, E.I.Shubin, Veremeenko, V.F. Precise NMR measurement and stabilization system of magnetic field of superconducting 7 Tesla wave length shifter. Proc.of 7th International conference of Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin, 2000. // NIM A 467 (2001), p.198-201.

- 105. V.M.Borovikov, M.G.Fedurin, G.V.Karpov, D.A.Korshunov, E.A.Kuper, M.V.Kuzin, V.R.Mamkin, A.S.Medvedko, N.A.Mezentsev, V.V.Repkov, V.A.Shkaruba, E.I.Shubin, N.I.Zinevich. System of NMR measurement and stabilization of magnetic field in superconducting wiggler at BESSY-II. Proc.of EPAC-2000 (Vienna, Austria), p.2474-2476.
- **106.** M.G. Fedurin, M.V. Kuzin, N.A. Mezentsev, V.A. Shkaruba, Status of the activity on fabrication and application of high-field superconducting wavelength shifters at Budker INP, //NIM A470 (2001), p. 34-37.
- 107. А.М.Батраков, Е.А.Бехтенев, В.М.Боровиков, В.К.Журба, М.Г.Федурин, В.В. Репков, Г.В.Карпов, С.В.Хрущев, Г.Н.Кулипанов, М.В.Кузин, В.К.Лев, Н.А.Мезенцев, В.А.Шкаруба. Сверхпроводящие сильнополевые вигглеры и шифтеры в ИЯФ СО РАН. // Вопросы атомной науки и техники. Серия ядерно-физические исследования (38), (Материалы 17 международного семинара по ускорителям заряженных частиц, Алушта, 2001), 2001, N3, с. 59-61.
- 108. A.M.Batrakov, E.A.Bekhtenev, V.M.Borovikov, V.K.Djurba, M.G.Fedurin, V.V.Repkov, G.V.Karpov, S.V.Khruschev, G.N.Kulipanov, M.V.Kuzin, V.K.Lev, N.A.Mezentsev, V.A.Shkaruba, Superconducting wave length shifters and multipole wigglers developed in Budker INP. Proc. of Second APAC –2001, Beijing, China, p.251-253.
- 109. D.Berger, M.Fedurin, N.Mezentsev, S.Mhaskar, V.Shkaruba, F.Schaefers, M.Scheer, E.Weihreter, A superconducting 7 T multipole wiggler for the BESSY-II synchrotron radiation source. Proc of PAC-2001, Chicago, p. 2450-2452.
- 110. Kuzin M.V., Lev V.Kh., Mezentsev N.A., Shkaruba V.A. Superconducting wavelength shifters and multipole wigglers developed in Budker INP. Proc. Of the ISTC-RIKEN Japan Workshop on Russia/CIS Accelerator Technologies, October 2-3, 2001.- Hirosawa, 2001, p.61-64.
- 111. Borovikov V.M., Djurba V.K., Fedurin M.G., Repkov V.V., Karpov G.V., Kulipanov G.N., Kuzin M.V., Mezentzev N.A., Shkaruba V.A., Kraemer D., Richter D. Superconducting 7T wavelength shifter for BESSY-II. Proc. Of the 7th Intern. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2000), Berlin,

Germany, August 21-25, 2000 /Ed. By W.Gudat, P.Zimmermann/. - Amsterdam, North-Holland, 2001, Pt.I. - p.181-184.

- 112. Batrakov A., Borovikov V., Bekhtenev E., Fedurin M., Hara M., Karpov G., Kuzin M., Mezentsev N., Miahara Y., Shimada T., Shkaruba A V., Soutome K., Tzumaki K. Superconducting wiggler for the SPRING-8 storage ring. Proc. of the 7th Intern. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2000), Berlin, Germany, August 21-25, 2000 /Ed. By W.Gudat, P.Zimmermann/. Amsterdam, North-Holland, 2001, Pt.I. 190-193.
- 113. Batrakov A., Ilyin I., Karpov G., Kozak V., Kuzin M., Kuper E., Mamkin V., Mezentsev N., Repkov V., Selivanov A., Shkaruba V. Control and data acquisition systems for high field superconducting wigglers. Proc. Of the 7th Intern. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2000), Berlin, Germany, August 21-25, 2000 /Ed. By W.Gudat, P.Zimmermann/. - Amsterdam, North-Holland, 2001, Pt.I. -p.202-205.
- 114. Шкаруба В.А., Сверхпроводящий трехполюсный генератор синхротронного излучения с полем 7,5 Тл и фиксированной точкой излучения: автореф. диссертация ... кандидата технических наук: 01.04.20, Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника / Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, 2001, 177 с.
- 115. D.Berger, E.Weihreter, N.Mezentsev, V.Shkaruba, A superconducting multipole 7 T wiggler for BESSY-II: main challenges and first field measurements. Proc. of EPAC-2002, Paris, France, p.2595-2597.
- 116. A.Batrakov, V.Jurba, S.Khrushchev, G.Kulipanov, E.Kuper, M.Kuzin, A.Medvedko, N.Mezentsev, V.Shkaruba, D.Zagrando, B.Diviacco, R.P.Walker, A Superconducting 3.5 T multipole wiggler for the ELETTRA storage ring. Proc. of EPAC-2002, Paris, France, p.2634-2636.
- 117. A.M.Batrakov, E.A.Bekhtenev, I.V.Ilyin, S.V.Khruschev, G.N.Kulipanov, M.V.Kuzin, N.A.Mezentsev, E.G.Miginskaya, V.V.Repkov, V.A.Shkaruba, V.M.Tsukanov, D.Zagrando, B.Diviacco, C.Knapic, Construction and tests of the 49-pole 3.5T superconducting wiggler for Elettra storage ring. Proc. of SRI-2003, San Francisco, USA, Volume 705, Issue 1, pp. 183-186

- 118. S.V.Khruschev, M.V.Kuzin, N.A.Mezentsev, E.G.Miginskaya, V.V.Repkov, V.A.Shkaruba, V.M.Tsukanov, 7 Tesla 17-pole superconducting wiggler for BESSY-II. Proc. of XVIII International Workshop on Charged Particle Accelerations. (Алушта 2003).
- 119. K.Soutome , S.Dat , H.Ego, T.Fukui, M.Hara, N.Hosoda, Y.Kawashima, M.Kodera, N.Kumagai, T.Magome, M.Masaki, T.Masuda, S.Matsui, T.Nakamura, T.Noda, Y.Ohashi, T.Ohshima, M.Oishi, H.Saeki, S.Sasaki, M.Shoji, S.Takano, M.Takao, T.Takashima, H.Takebe, K.Tamura, H.Tanaka, Y.Taniuchi, K.Tsumaki, T.Yorita, C.Zhang, H.Yonehara, J.Schimizu, A.Batrakov, G.Karpov, G.Kulipanov, M.Kuzin, V.Shkaruba, A.Skrinsky, N.Mezentsev, A generation of high-energy synchrotron radiation with 10-T superconducting wiggler installed in the SPring-8 storage. Proc. of PAC-2003, Portland, USA, p.250-252.
- 120. Бехтенев Е., Дементьев Е., Мезенцев Н., Мигинская Е., Цуканов В., Шкаруба В., Измерение интегралов магнитного поля в многополюсном вигглере. XVIII Конф. по ускорителям заряженных частиц (RUPAC-2002), ГНЦ РФ ФЭИ им.А.И.Лейпунского, Обнинск, 1-4 окт.2002.- Сб.докл.в 2-х томах, Обнинск, 2004, 2, с.544-546.
- 121. Khruchev S.V., Kuzin M.V., Mezentsev N.A., Miginsky E.G., Repkov V.V., Shkaruba V.A., Tsukanov V.M. 7 Tesla 17-pole superconducting Wiggler for BESSY- II. // Problems of atomic science and technology, Ser.Nucl.Phys.Inv., 2004,1, p.80-82.
- 122. E.Weihreter, J.Feikes, P.Kuske, R.Müller, G.Wüstefeld, D.Berger, N.Mezentsev, V.Shkaruba, A 7T wiggler for BESSY-II: Implementation and commissioning results. Proc. of EPAC-2004, Lucerne, Switzerland, p.324-326.
- 123. S.V.Khruschev, G.N.Kulipanov, V.H.Lev, N.A.Mezentsev, E.G.Miginsky, V.A.Shkaruba, V.M.Syrovatin, V.M.Tsukanov, K.V.Zolotarev, D.Kraemer, 9 Tesla Superbend for BESSY-2. Proc. of the 3rd APAC-2004, Korea, 356- 358.
- 124. K.V. Zolotarev, A.M. Batrakov, S.V. Khruschev, G.N. Kulipanov, V.H. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.A. Shkaruba, V.M. Syrovatin, V.M. Tsukanov, V.K. Zjurba, D. Kraemer, High magnetic field superconducting magnets fabricated in Budker INP for SR generation. Proc.of RuPAC XIX, Dubna -2004, p.40-44.

- 125. A.M.Batrakov, S.V. Khruschev, D.Kraemer, G.N.Kulipanov, V.H. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.A. Shkaruba, V.M. Syrovatin, V.M. Tsukanov, V.K.Zjurba, K.V.Zolotarev, Nine tesla superconducting bending magnet for BESSY-II. // NIM A543 (2005), p. 35-41.
- 126. S.V. Khruschev, V. Lev, N.Mezentsev, E. Miginsky, V. Repkov, V. Shkaruba, V. Syrovatin, V. Tsukanov, 3.5 Tesla 49-pole superconducting wiggler for DLS . Proc.of RuPAC XX, Novosibirsk -2006, p.398-400.
- 127. E.Bekhtenev, S.Khrushchev, N.Mezentsev, E.Miginsky, V.Shkaruba, V.Tsukanov, The main test results of the 3.5 Tesla 49-pole superconducting wiggler for DLS. Proc.of RuPAC XX, Novosibirsk -2006, p.404-406.
- 128. S.V. Khruschev, E.A. Kuper, V.H. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.V. Repkov, V.A. Shkaruba, V.M. Syrovatin, V.M. Tsukanov, Superconducting 63-pole 2T wiggler for Canadian Light Source. Proc. of XIX International Workshop on Charged Particle Accelerations. (Alushta 2005), // Problems of Atomic Science and Technology, 2006, N2, p. 172-174.
- 129. E.A.Bekhtenev, M.V. Kuzin, S.V. Khruschev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.A. Shkaruba, V.M. Tsukanov, Magnetic measurement of the 63-pole 2 Tesla superconducting wiggler for Canadian Light Source. Proc. of XIX International Workshop on Charged Particle Accelerations. (Alushta 2005), //Problems of Atomic Science and Technology, 2006, N2, p. 175-177.
- 130. Е. А. Бехтенев, Э. А. Купер, В. Х. Лев, Н. А. Мезенцев, Е. Г. Мигинская, В. В. Репков, В. М. Сыроватин, С. В. Хрущев, В. М. Цуканов, В. А. Шкаруба. Сверхпроводящий многополюсный вигглер для канадского центра синхротронного излучения. // Письма в журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2006, т. 3, N7, с.33-41
- 131. E.A.Bekhtenev, S.V. Khruschev, E.A. Kuper, V.H.Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.V.Repkov, V.A. Shkaruba, V.M.Syrovatin, V.M. Tsukanov, A Multipole Superconducting Wiggler for Canadian Light Source. // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2006, Vol. 3, Suppl. 1, pp. S16–S21, 2006.

- 132. Е.А.Бехтенев, М.В.Кузин, Н.А.Мезенцев, Е.Г.Мигинская, С.В.Хрущев, В.М.Цуканов, В.А.Шкаруба, Система магнитных измерений сверхпроводящих многополюсных вигглеров. // Поверхность (2006) N12, с.23-26.
- 133. A. M. Batrakov, S. V. Khruschev, G. N. Kulipanov, E. A. Kuper, V. H. Lev, N. A. Mezentsev, E. G. Miginsky, V. V. Repkov, V. A. Shkaruba, V. M. Syrovatin, V. M. Tsukanov, K. V. Zolotarev, V. K. Zjurba, Superconducting Insertion Devices for Light Sources at Budker INP. Proc.of 9 International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, 2007, Volume 879, pp. 305-310.
- 134. S.V. Khruschev, E.A. Kuper, V.H. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky,
 V.V. Repkov, V.A. Shkaruba, V.M. Syrovatin, V.M. Tsukanov, Superconducting
 63-pole 2T wiggler for Canadian Light Source. // NIM A575 (2007), p. 38-41.
- 135. A.Valentinov, V.Korchuganov, M.Kovalchuk, Yu.Krylov, V.Kvardakov, D.Odintsov, Yu.Yupinov, S.Khrushev, N.Mezentsev, E.Miginsky, V.Shkaruba, V.Tsukanov, First results of SIBERIA-2 storage ring operation with 7.5 T superconducting wiggler. Proceedings of RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, p.185 187.
- 136. S.V. Khruschev, V.H. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.A. Shkaruba, V.M. Syrovatin, V.M. Tsukanov, 27-Pole 4.2 T wiggler for biomedical imaging and therapy beamline at the Canadian light source. // NIM A603 (2009), p. 7-9.
- S.V. Khruschev, V.H. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.A. Shkaruba,
 V.M. Tsukanov, Optimization of wigglers side poles. // NIM A603 (2009), p. 19-21.
- 138. Мезенцев Н.А., Шкаруба В.А., Обзор сверхпроводящих вставных устройств для генерации СИ. VII Нац. конф. "Рентгеновское, Синхротронное излучения, Нейтроны и Электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии" РСНЭ-НБИК 2009, 16-21 ноября 2009, Тезисы докладов.- М.:ИК РАН – РНЦ КИ, 2009.-с.549.
- 139. Лев В.Х., Мезенцев Н.А., Мигинская Е.Г., Сыроватин В.М., Хрущев С.В., Цуканов В.М., Шкаруба В.А., Сверхпроводящий 119-полюсный вигглер с полем 2.1 Т и периодом 30 мм для накопителя ALBA. XVIII Международная конференция по синхротронному излучению «СИ-2010», книга тезисов.-Новосибирск ИЯФ СО РАН, 2010.- с.23
- 140. S.V. Khrushchev, V.K. Lev, N.A. Mezentsev, E.G. Miginsky, V.A. Shkaruba, V.M. Syrovatin, V.M. Tsukanov, A.A. Volkov, J. Campmany, D. Einfeld. Superconducting 119-pole wiggler for ALBA light source. Proc. of IPAC-2011, San Sebastian, Spain, p.3304-3306.
- 141. Волков А.А., Лев В.Х., Мезенцев Н.А., Мигинская Е.Г., Сыроватин В.М., Хрущев С.В., Цуканов В.М., Шкаруба В.А., Сверхпроводящий 119полюсный вигглер с полем 2.1 Т и периодом 30 мм для накопителя ALBA. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2012, N5, с.3-12.
- 142. Volkov A.A., Lev V.K., Mezentsev N.A., Miginskaya E.G., Syrovatin V.M., Khrushchev S.V., Tsukanov V.M., Shkaruba V.A., Superconducting 119-Pole wiggler with 2.1T field and 30 mm period length for the ALBA storage ring. // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2012. T. 6. № 3. C. 379-387.
- 143. Bragin A.V., Khruschev S.V., Mezentsev N.A., Miginskya E.G., Poletaev I.V., Shkaruba V.A., Syrovatin V.M., Zolotarev K.V., Lev V.K. Indirect cooled superconductive wiggler magnet. RuPAC 2012 Contributions to the Proceedings 23rd Russian Particle Accelerator Conference pp. 140 142.
- 144. D.Zangrando, R. Bracco, D.Castronovo, M.Cautero, E Karantzoulis, S.Krecic, G.Loda, D.Millo, L.Pivetta, G.Scalamera, R.Visintini, S.V.Khrushchev, N.Mezentsev, V.Shkaruba, V.Syrovatin, O.Tarasenko, V.Tsukanov, A.Volkov, The ELETTRA 3.5 T superconducting wiggler refurbishment. Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, pp.2687-2689.
- 145. Khrushchev S., Mezentsev N., Lev V., Shkaruba V., Syrovatin V., Tsukanov V., Superconducting multipole wigglers: state of art. Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, pp. 4103-4106.
- 146. Mezentsev N., Shkaruba V., Syrovatin V., Superconducting Multipole Wigglers: Magnetic and Cryogenic Systems. 13th Cryogenics IIR International Conference: Refrigeration Science and Technology. Prague, CZECH REPUBLIC, 2014, Issue 1, pp.81-87.

- A. A. Volkov, A. V. Zorin, V. Kh. Lev, N. A. Mezentsev, V. M. Syrovatin, O. A. Tarasenko, S. V. Khrushchev, V. M. Tsukanov, V. A. Shkaruba, The Superconducting 15-Pole 7.5 Tesla Wiggler in the LSU CAMD Storage Ring. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 1, pp. 53–59.
- 148. А. А. Волков, А. В. Зорин, В. Х. Лев, Н. А. Мезенцев, В. М. Сыроватин, О. А. Тарасенко, С. В. Хрущев, В. М. Цуканов, В. А. Шкаруба, Сверхпроводящий 15-полюсный вигглер с полем 7.5 Тл для накопителя LSU-CAMD. // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2015, том 79, № 1, с. 62–68.
- 149. S. V. Khrushchev, V. A. Shkaruba, N. A. Mezentsev, V. M. Tsukanov, V. K. Lev, Zeroing Magnetic Field Integrals for Wigglers and Undulators with Even Numbers of Poles. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 1, pp. 44–48.
- 150. А. А. Волков, А. В. Зорин, В. Х. Лев, Н. А. Мезенцев, В. М. Сыроватин, О. А. Тарасенко, С. В. Хрущев, В. М. Цуканов, В. А. Шкаруба. Особенности зануления интегралов магнитного поля в вигглерах и ондуляторах с чётным числом полюсов. // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2015, том 79, № 1, с. 52–58.
- 151. R. S. Amin, P. Jines, D. Launey, K. Morris, V. P. Suller, Y. Wang, N. Mezentsev, S. Khruschev, V. Lev, V. Shkaruba, V. Syrovatin, O.Tarasenko, V.Tsukanov, A. Volkov, A. Zorin, A preliminary report from Louisiana State University CAMD storage ring operating with an 11 pole 7.5 Tesla wiggler. Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, S.I. : JACoW, 2015. P. 1682-1685.
- **152.** KHRUSCHEV Sergey, LEV Vladimir, MEZENTSEV Nikolay, SHKARUBA Vitaliy, SYROVATIN Vasiliy, TARASENKO Olga, TSUKANOV Valeriy, VOLKOV Askold, ZORIN Artem, Magnetic system of the high field superconducting multipole wiggler for LSU CAMD. Proceedings of 12 European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS-2015), Lyon, France,

September. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2016.- Volume:26, Issue:3, p.7389339.

- 153. Alexey Bragin, Axel Bernhard, Sara Casalbuoni, Laura Garcia Fajardo, Paolo Ferracin, Andreas Grau, Yevgeny Gusev, Steffen Hillenbrand, Sergey Khruschev, Iliya Poletaev, Vitaliy Shkaruba, Daniel Schoerling, Vasily Syrovatin, Olga Tarasenko, Valeriy Tsukanov, Askold Volkov, Konstantin Zolotarev, Nikolay Mezentsev, Test results of a CLIC damping wiggler prototype. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, Volume:26, Issue:4, p.4102504.
- 154. A.Bernhard, J.Gethmann, S.Casalbuoni, S.Gerstl, A.W.Grau, E.Huttel, A.-S.Mueller, D.Saez de Jauregui, N.J.Smale, A.V.Bragin, S.V. Khrushchev, N.A.Mezentsev, V.A.Shkaruba, V.M.Tsukanov, K.V.Zolotarev, P.Ferracin, L.Garcia Fajardo, Y.Papaphilippou, H.Schmickler, D.Schoerling, A CLIC damping wiggler prototype at ANKA: commissioning and preparation for a beam dynamics experimental program. Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea. p.2412-2415.
- A.Bragin, S.Khrushchev, V.Kubarev, N.Mezentsev, V.Shkaruba, G.Sozinov,
 V.Tsukanov, Superconducting solenoid for superfast THz spectroscopy. SRF-2016, //Physics Procedia 84 (2016) 82-85.
- 156. A.Bragin, Ye.Gusev, S.Khrushchev, N.Mezentsev, V.Shkaruba, V.Syrovatin, O.Tarasenko, V.Tsukanov, A.Volkov, K. Zolotarev, A.Zorin, Superconducting 72-pole indirect cooling 3Tesla wiggler for CLIC dumping ring and ANKA image beamline. SRF-2016, // Physics Procedia 84 (2016) 54-61.
- 157. S.Khrushchev, V.Lev, N. Mezentsev, V.Shkaruba, V.Syrovatin, V.Tsukanov, K.Zolotarev, Performance of Nitrogen Heat Tubes in Cooling Down of Superconducting Magnets. SRF-2016, // Physics Procedia 84 (2016) 90-95.
- 158. S.Khrushchev, N.Mezentsev, V.Shkaruba, V.Syrovatin, V.Tsukanov, The research of the superconducting undulator prototype with neutral poles and features of the magnetic field distribution in it. SRF-2016, // Physics Procedia 84 (2016) 62-66.