

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Новосибирский государственный технический университет»

“УТВЕРЖДАЮ”

Начальник ОПКВК

В.П. Драгунов

2017 г.



## **ПРОГРАММА – МИНИМУМ**

кандидатского экзамена по специальности

**01.04.20 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»**

**(технические науки)**

Новосибирск

2017г.

Программа обсуждена на заседании ученого совета физико-технического факультета  
протокол № 2 от 17.05.2017 г.


Программу разработал  
профессор кафедры ЭФУиУ,  
д.ф.-м.н.

  
(Е.Б.Левичев)

Декан ФТФ,  
к.ф.-м.н., доцент

  
(И.И.Корель)

Ответственный за основную  
образовательную программу  
д.ф.-м.н.,

  
(А.В.Бурдаков)

## **Введение**

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: теория поля, электродинамика сплошных сред, теоретические основы электротехники и радиотехники, вакуумная техника, приборы и техника СВЧ-электроники, физика пучков заряженных частиц и ускорители заряженных частиц.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации по физике при участии ГНЦ ИТЭФ и Института ядерных исследований РАН.

## **Общие вопросы**

История развития ускорительной техники. Вклад отечественной научной школы. Применение пучков заряженных частиц в различных областях науки, техники и народного хозяйства. Ускорительные центры России и мира.

## **I. Физика пучков заряженных частиц**

### **1. Основные понятия и теоремы**

1.1. Общее определение пучка частиц. Основные свойства пучков, характеристики орбит в ускорителях.

1.2. Фазовое пространство и понятие ансамбля частиц в приложении к описанию пучков. Теорема Лиувилля. Адиабатические инварианты.

1.3. Уравнение движения заряженных частиц в электромагнитных полях. Система уравнений Максвелла. Собственные поля пучков. Уравнения Власова.

1.4. Модели пучков. Ламинарные пучки и гидродинамическое приближение. Неламинарные пучки без столкновений. Пучки со столкновениями и диссипацией.

1.5. Математические модели пучков. Метод крупных частиц. Методы решения уравнений Пуассона и Максвелла.

1.6. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами. Теорема Флоке. Анализ устойчивости.

1.7. Основные свойства электромагнитных волноводов и резонаторов. Дисперсионные характеристики.

### **2. Источники пучков заряженных частиц**

2.1. Электронная эмиссия: термоэмиссия, автоэмиссия, плазменная (в том числе взрывная) эмиссия, фотоэмиссия. Основные характеристики катодов на основе каждого из видов эмиссии.

2.2. Электронные пушки. Формирование пучков. Первеанс, эмиттанс, яркость пучков. Формирование электронных пучков с малым эмиттансом. Типы электронных пушек.

2.3. Ионные источники. Механизмы генерации положительных, отрицательных, поляризованных ионов. Формирование пучков. Первеанс, эмиттанс и яркость пучков. Типы ионных источников.

### **3. Транспортировка пучков заряженных частиц**

3.1. Магнитные и электростатические линзы с продольными и поперечными полями: аксиально-симметричные, цилиндрические, квадрупольные, мультипольные. Фокусное расстояние линзы, матрица преобразования пучка.

3.2. Магнитные линзы с азимутальным полем: параболические, «литиевые», магнитные горны, плазменные линзы.

3.3. Поворотные магниты, их фокусирующие и диспергирующие свойства. Градиентная и краевая фокусировка. Матрица преобразования пучка.

3.4. Электростатические отклоняющие устройства. Фокусирующие свойства, матрица преобразования.

3.5. Анализаторы заряженных частиц. Разрешение по импульсу-энергии.

3.6. Матричный анализ движения частиц в канале. Описание пучков в фазовом пространстве. Фазовые эллипсы. Уравнение моментов и огибающие пучки частиц. Аксептанс канала.

3.7. Транспортировка пучков в продольном магнитном поле. Теорема Буша. Источник, погруженный в магнитное поле; источник полностью или частично экранированный. Аксептанс канала.

3.8. Системы из квадрупольных линз (дублет, триплет, симметричные и периодические системы).

3.9. Оптические системы из квадрупольных линз и отклоняющих магнитов. Симметричные бездисперсные и изохронные системы, ахроматические каналы.

3.10. Аберрационные эффекты. Хроматические аберрации, нелинейности, нестабильности питания элементов магнитной оптики, ошибки в установке (юстировке) квадрупольных линз и магнитов.

### **4. Способы формирования пучков частиц различного сорта на современных ускорителях**

4.1. Методы вывода ускоренных пучков из циклических ускорителей. Деление выведенных пучков на части.

4.2. Взаимодействие выведенных пучков с мишенью. Выходы вторичных частиц. Радиационный разогрев мишеней.

4.3. Способы формирования мюонных и нейтронных пучков.

4.4. Методы сепарации заряженных частиц по массам. Электростатические и высокочастотные сепараторы и их возможности.

## **5. Ускорение заряженных частиц**

5.1. Динамика частиц в циклических ускорителях. Ускорители с мягкой и жесткой фокусировкой. Поперечные колебания частиц, уравнения огибающей, условие устойчивости. Матричный анализ движения частиц. Бетатронная и дисперсионная функции. Адиабатическое изменение параметров поперечных колебаний. Поперечные колебания при наличии возмущений, резонансы.

5.2. Ускорение в статических и квазистатических электрических полях. Ускорители прямого действия. Динамика пучка при ускорении в постоянном электрическом поле, действие пространственного заряда.

5.3. Импульсное ускорение ионов в вакуумных диодах с магнитной изоляцией; пинч-диоды, отражательные триоды и тетроды, обращенный отражательный тетрод. “Газодинамический” метод ускорения ионов.

5.4. Ускорение частиц в вихревом электрическом поле. Бетатрон .

5.5. Линейные ускорители. Особенности ускорителей электронов, протонов и тяжелых ионов. Автофазировка. Инжекция частиц в линейный ускоритель. Динамика частиц в линейных ускорителях. Особенности транспортировки частиц в линейных ускорителях, влияние пространственного заряда и излучения пучка.

5.6. Высокочастотная фокусировка. Фазопеременная фокусировка. Квадрупольная высокочастотная фокусировка. Динамика пучка в канале с ПОКФ - пространственно-однородной квадрупольной высокочастотной фокусировкой.

5.7. Циклические ускорители. Автофазировка, критическая энергия. Фазовое движение частиц, продольный фазовый объем пучка. Адиабатическое затухание фазовых колебаний. Синхротрон, синхрофазотрон (протонный синхротрон). Циклотрон. Фазотрон. Микротрон. Изохронный циклотрон. Каскадные схемы ускорения частиц до высоких энергий, бустерные синхротроны.

5.8. Методы генерации ускоряющего электромагнитного поля: сгустками электронов, плазменными колебаниями, движущимися электронными пучками. Методы создания ЛСЭ – лазеров на свободных электронах.

## **6. Интенсивные пучки заряженных частиц**

6.1. Пучок заряженных частиц в вакууме. Виртуальный катод; облако осциллирующих электронов; предельный «вакуумный» ток пучка. Поперечное движение под действием собственных полей.

6.2. Транспортировка интенсивных пучков. Предельный ток пучка в вакуумном канале с разделенными функциями, в канале с продольным магнитным полем. Брюллюэновский поток.

6.3. Транспортировка интенсивных пучков в газе и плазме. Обратный ток. Неустойчивости пучков, влияние продольного магнитного поля на устойчивость пучков. Коллективные потери энергии пучка в плазме. Компенсация пространственного заряда и тока электронного пучка. Релятивистский стабилизированный пучок.

6.4. Пространственный заряд пучка в циклических ускорителях. Кулоновский сдвиг частот поперечных колебаний.

6.5. Взаимодействие интенсивных пучков со структурой канала транспортировки и ускоряющей системой (циклические и однопролетные системы). Затухание когерентных колебаний. Неустойчивость пучков.

6.6. Внутрипучковое рассеяние.

## **7. Синхротронное излучение и охлаждение пучков заряженных частиц**

7.1. Синхротронное излучение и радиационное трение. Основные характеристики синхротронного излучения, его применение. Движение частиц в ускорителе (канале транспортировки) в присутствии синхротронного излучения. Декременты затухания колебаний частиц. Установившийся размер пучка. Генераторы синхротронного излучения.

7.2. Ионизационное трение. Основные характеристики метода, области его применения.

7.3. Электронное охлаждение. Основные характеристики метода, области его применения.

7.4. Стохастическое охлаждение. Шоттки-шум. Основные характеристики метода. Области применения.

## **8. Метод встречных пучков**

8.1. Основные характеристики метода: энергия реакции, светимость. Циклические и линейные пучки.

8.2. Накопление заряженных частиц. Методы конверсии, многократное накопление в заданный фазовый объем, охлаждение.

8.3. Ограничения светимости установки со встречными пучками. Эффекты встречи.

8.4. Время жизни пучка в накопителе. Взаимодействие пучка с остаточным газом и встречным пучком. Влияние охлаждения.

## **9. Поляризованные пучки**

9.1. Источники поляризованных пучков протонов и ядер. Метод Штерна—Герлаха.

9.2. Радиационная поляризация электронных пучков в накопителях.

9.3. Поляризация циркулирующих пучков тяжелых частиц в накопителе на поляризованной тонкой мишени. Роль охлаждения пучков.

9.4. Динамика поляризованных пучков в циклических ускорителях (накопителях), спиновые траектории и спиновые резонансы, управление поляризацией.

# **II. Ускорительная техника**

## **10. Техника ускорения и формирования пучков заряженных частиц**

10.1. Ускорители прямого действия: каскадные ускорители с умножением напряжения Кокрофт-Уолтона, электростатические ускорители (ЭСУ) Ван-де-Граафа, тандемы ускоритель-трансформатор. Генераторы импульсного напряжения (ГИНы). Формирующие

линии, конденсаторы-накопители. Рабочий диапазон ускорителей прямого действия, их параметры. Способы стабилизации энергии частиц. Коммутация импульсных напряжений. Прикладные применения ускорителей прямого действия.

10.2. Линейные ускорители. Общие характеристики принципа их действия и конструкции, преимущества и недостатки по сравнению с кольцевыми ускорителями. Основные системы линейных ускорителей в комплексе.

Линейные ускорители электронов. Типы ускоряющих систем, варианты со стоячей и бегущей волной. Особенности конструкции и основные параметры машин для прикладных применений, для физики.

Линейные ускорители протонов и ионов. Ионные источники. Особенности резонаторов и ускоряющих структур для ионов различных энергий, сверхпроводящие резонаторы. Импульсные инжекторы протонных синхротронов. Сверхмощные ускорители для мезонных фабрик, нейтронных и нейтринных генераторов, импульсный и непрерывный режим, предельные энергии и токи.

10.3. Индукционные ускорители. Бетатрон. Линейный бетатрон. Особенности конструкции, параметры.

10.4. Магнитные системы циклических ускорителей. Конструктивные особенности элементов магнитной системы (соленоиды, диполи, квадруполь, линзы высших порядков). Железные и безжелезные магнитные системы. Сверхпроводящие магнитные системы, их параметры. Системы питания и требования к ним. Применение постоянных магнитов.

10.5. Ускоряющие резонаторы и системы ВЧ-питания циклических ускорителей. «Теплые» и сверхпроводящие ускоряющие резонаторы, источники ВЧ-мощности. ВЧ-системы электрон-позитронных накопителей встречных пучков и источников синхротронного излучения. Особенности ускоряющих структур и источников ВЧ-мощности. Обеспечение устойчивого движения сгустка частиц.

10.6. Вакуумные системы ускорителей. Методы получения высокого и сверхвысокого вакуума, измерение давления остаточного газа, анализ его состава.

10.7. Системы инжекции и вывода пучка. Инжекция в циклические ускорители, многооборотная инжекция, перезарядная инжекция. Быстрый и медленный выходы пучка.

10.8. Устройства для управления ускорителями и контроля их параметров, применение ЭВМ.

## **11. Диагностика пучков заряженных частиц**

11.1. Измерение тока пучка. Импульсные пучки, циркулирующие сгруппированные пучки – пояс Роговского, емкостные датчики тока. Непрерывные пучки – измеритель магнитного поля пучка. Мониторы выведенных (сброшенных) пучков, цилиндр Фарадея.

11.2. Измерение эмиттанса пучка.

11.3. Контроль положения и профиля пучка. Емкостные и магнитно-индукционные датчики. Вторично-эмиссионные детекторы, методы тонкой мишени. Контроль пучка по свечению остаточного газа.

11.4. Контроль параметров электронных, позитронных пучков в накопителях по синхротронному излучению.

## **12. Радиационная безопасность при работе на ускорителях заряженных частиц**

12.1. Взаимодействие излучения с веществом.

12.2. Радиационная активность ускорителей различных типов.

12.3. Обеспечение безопасной работы обслуживающего персонала.

12.4. Влияние излучения на материалы и радиоэлектронное оборудование.

## **13. Прикладные применения ускорителей в медицине и промышленности**

Установки и комплексы: ИЛУ и ЭЛВ

## **14. Основные особенности и характеристики крупных действующих ускорительных установок и ускорительно-накопительных комплексов**

Установки и комплексы: ВЭПП-4, FAKEL, И-100, ММФ (МЕГАН), У-70, AGS, APS, BEPC, CEBAF (TJNAF), CESR, ELETTRA, HERA, KEKB, LAMPF (MLNSCE), LEP-II, LUE-2000, NUCLOTRON, PEP-II, PLS, RHIC, RIKEN, SING (PSI), SIS, SLC, SPS, TEVATRON, TRIUMF, SLAC:

## **Перспективы развития отрасли**

1. Перспективы ускорительной техники и физики пучков заряженных частиц.
2. Применение сверхпроводимости в магнитных и высокочастотных системах ускорителей.
3. Проекты новых крупных ускорительных и ускорительно-накопительных комплексов: ВЭПП-2000, УНК, ТВН (TWAC), АРТ, ВТСФ, CLIC, ESS, IFMIF, JLC, LHC, MUSES, NLC, SLC, SNS, TESLA и др.
4. Перспективы применения ускорителей в инерциальном термоядерном синтезе.

## **Основная литература**

Коломенский А.А. Физические основы методов ускорения заряженных частиц. М.: Изд-во МГУ, 1980.

Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. В 3 т. М.: Энергоиздат, 1981-1983; 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Комар Е.Г. Основы ускорительной техники. М.: Атомиздат, 1975.

Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980.

Ливингуд Дж. Принципы работы циклических ускорителей. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.



- Мешков И.Н. Основные тенденции развития ускорителей // 16-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 1. Протвино, 1998.
- Ширшов Л.С. Ускорители заряженных частиц // Атомная техника за рубежом. 1998. № 9.
- Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. М.: Наука, 1985.
- Гаврилов Н.М. Введение в физику ускоряющих систем. Ч. 1, 2. М.: МИФИ, 1990.
- Зверев Б.В., Собенин Н.П. Электродинамические характеристики ускоряющих резонаторов. М.: Энергоатомиздат, 1993.
- Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
- Браун Я. Физика и технология источников ионов. М.: Мир, 1998.
- Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- Карташев В.П., Котов В.И. Основы магнитной оптики пучков заряженных частиц высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- Котов В.И., Миллер В.В. Фокусировка и разделение по массам частиц высоких энергий. М.: Атомиздат, 1969.
- Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1978.
- Мешков И.Н. Транспортировка пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 1991.
- Мызников К.П. Обзор результатов по разработке высокоэффективных систем вывода ускорителей на высокие энергии // 5-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. М.: Наука, 1977.
- Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1978.
- Вальднер О.А., Глазков А.А. Высоковольтные ускорители. М.: МИФИ, 1986.
- Вальднер О.А., Глазков А.А. Индукционные ускорители. М.: МИФИ, 1985.
- Капица С.П., Мелехин В.Н. Микротрон. М.: Наука, 1962.
- Вальднер О.А., Глазков А.А. Новые конструкции ускорителей циклотронного типа. М.: МИФИ, 1987.
- Вальднер О.А., Глазков А.А. Современные синхротроны. М.: МИФИ, 1989.
- Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах. М.: Мир, 1987.
- Коломенский А.А. Лазерное ускорение частиц // 9-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Дубна, 1985.

Линейные ускорители ионов / Д.В. Каретников, И.Н. Сливков, В.А. Тепляков и др. М.: Госатомиздат, 1962.

Линейные ускорители ионов. В 2 т. / Б.П. Мурин, Б.И. Бондарев, В.В. Кушин, А.П. Федотов. М.: Атомиздат, 1978.

Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982.

Капчинский И.М., Тепляков В.А. Развитие линейных ускорителей ионов с высокочастотной квадрупольной фокусировкой // 11-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 1. Дубна, 1989.

Вальднер О.А., Глазков А.А. Динамика частиц и фокусировка в линейных ускорителях ионов. М.: МИФИ, 1989.

Синхротронное излучение и его применения / И.М. Тернов и др. М.: Изд-во МГУ, 1990.

Пархомчук В.В., Пестриков Д.В. Развитие и перспективы метода электронного охлаждения // 17-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Протвино, 2000.

Вальднер О.А., Глазков А.А. Столкновители заряженных частиц – коллайдеры. М.: МИФИ, 1991.

Поляризованные частицы в накопителях / Я.С. Дербенев и др.

X Междунар. конф. по ускорит. заряд. част. выс. энерг. Т. 2. Серпухов: ИФВЭ, 1977.

Диденко А.Н., Севрюкова Л.М., Ятис А.А. Сверхпроводящие ускоряющие СВЧ структуры. М.: Энергоиздат, 1981.

Ширшов Л.С. Сверхпроводящие магниты для ускорителей // Атомная техника за рубежом. 1998. № 2.

Ворогушин М.Ф., Малышев В.Н. Высокочастотное питание резонаторных ускорителей прикладного назначения. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Мурин Б.П. Стабилизация и регулирование высокочастотных полей в линейных ускорителях ионов. М.: Атомиздат, 1971.

Глазков А.А. Вакуумные системы электрофизических установок. М.: Атомиздат, 1975.

Скринский А.Н. Ускорительные и детекторные перспективы физики элементарных частиц // УФН. 1982. Т. 138. Вып.1.

Комочков М.М., Лебедев В.Н. Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Агафонов А.В. Ускорители в медицине // 15-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Протвино, 1996.

Принципы построения госпитальных центров протонной лучевой терапии на базе специализированных медицинских ускорителей // В.С. Хорошков и др. 16-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Протвино, 1998.

Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный термоядерный синтез. М.: Энергоатомиздат, 1984.

### **Дополнительная литература к разделу I**

Бурштейн Э.Л. Ускорители: Статья // Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983.

Мешков И.Н. Ускорители в физике элементарных частиц (от электрона к хиггсу) // II Науч. сем. памяти В.П. Саранцева. Дубна: ОИЯИ, 1998.

Капчинский И.М. Сильноточные линейные ускорители ионов // УФН. 1980. Т. 32, вып.4.

Капчинский И.М. Интенсивные линейные ускорители для материаловедческих исследований // 6-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 1. Дубна, 1979.

Рябухин Ю.С. Ускоренные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1980.

Сильноточный линейный ускоритель протонов для электроядерных систем / В.Н. Михайлов, П.В. Богданов, О.В. Шведов и др. // III Науч. сем. памяти В.П. Саранцева. Дубна: ОИЯИ, 2000.

Лазарев Н.В., Козодаев А.М. Сверхмощные линейные ускорители протонов для нейтронных генераторов и электроядерных установок // Атомная энергия. 2000. Т. 89, вып.6; 17-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Протвино, 2000.

Разработка, эксплуатация и применение линейных ускорителей / Под ред. А.В. Шальнова. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Салимов Р.А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения // УФН. 2000. Т. 170. № 2.

Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977.

Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Чувило И.В., Гольдин Л.Л., Хорошков В.С. Получение короткоживущих и ультракороткоживущих радионуклидов для использования в медицине // 9-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Дубна, 1985.

### **Дополнительная литература к разделу II**

Ускорение заряженных частиц. Терминология. АН СССР: Сборники рекомендуемых терминов. М.: Наука, 1977. Вып. 89.

Якубович В.А., Старжинский В.М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. М.: Наука, 1972.

Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1978.

Диафрагмированные волноводы: Справочник / О.А. Вальднер, Б.В. Зверев, Н.П. Собенин, И.С. Щедрин. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчета и проектирования. М.: Радио и связь, 1984.

Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. Л.: Энергия, 1972.

Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972 .

Форрестер Ф.Т. Интенсивные ионные пучки. М.: Мир, 1992.

Штеффен К. Оптика пучков высокой энергии. М.: Мир, 1969.

Лазерный источник высокозарядных ионов для ускорительно-накопительного комплекса ИТЭФ-ТВН / А.Н. Балабаев, В.Н. Балануца, С.А. Кондрашев и др. // 17-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 1. Протвино, 2000.

Баянов Б.Ф., Всеволожская Т.А., Селиверстов Г.И. Литиевые линзы для фокусировки вторичных пучков высоких энергий // 6-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Дубна, 1979.

Грачев М.И., Котов В.И., Самойлов А.В. Формирование и сепарация пучков адронов и лептонов // 5-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. М.: Наука, 1977.

Коломенский А.А., Лебедев А.Н. Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962.

Брук Г. Циклические ускорители заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1970.

Лихтенберг А. Динамика частиц в фазовом пространстве. М.: Атомиздат, 1972.

Альбертинский Б.И., Свиньин М.П. Каскадные генераторы. М.: Атомиздат, 1980.

Синхротронное излучение: Сб. статей / Под ред. Н.Г. Басова. М.: Наука, 1975.

Будкер Г.И., Скринский А.Н. Электронное охлаждение и новые перспективы в физике элементарных частиц // УФН. 1978. Т. 124. Вып. 4.

Ван дер Меер С. Стохастическое охлаждение и накопление антипротонов // УФН. 1985. Т. 147. Вып. 2.

### **Дополнительная литература к разделу III**

Димов Г.И., Дудников В.Г. Перезарядный метод управления потоками ускоренных частиц // Физика плазмы. 1978. Т. 4. Вып. 3.

Безкровный В.И., Гуревич А.С., Лосев Г.А. Вывод протонного пучка в диапазоне энергий 200ч1300 МэВ для прикладных исследований // 17-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Протвино, 2000.

Рубин С.Б. Взаимодействие электронного сгустка с ускоряющей системой. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Москалев В.А. Бетатроны. М.: Энергоиздат, 1981.

Власов А.Д. Теория линейных ускорителей. М.: Атомиздат, 1965.

Вальднер О.А., Глазков А.А. Динамика электронов в линейных ускорителях. М.: МИФИ, 1988; Вахрушин Ю.П., Анацкий А.И. Линейные индукционные ускорители. М.: Атомиздат, 1978.

Вальднер О.А., Власов А.Д., Шальнов А.В. Линейные ускорители. М.: Атомиздат, 1969.

Бурштейн Э.Л., Воскресенский Г.В. Линейные ускорители электронов с интенсивными пучками. М.: Атомиздат, 1970.

Быстров Ю.А., Иванов С.А. Ускорители и рентгеновские приборы. М.: Высш. шк., 1983.

Богданович Б.Ю. Линейные ускорители и физика пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Павловский А.И., Босамыкин В.С. Безжелезные линейные индукционные ускорители // Атомная энергия. 1974. Т. 37. Вып. 3.

Фазотрон ОИЯИ – физический пуск / Ю.Г. Аленицкий, В.Н. Аносов, А.В. Богомоллов и др. // 9-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 1. Дубна, 1985.

Первая очередь лазера на свободных электронах для Сибирского центра фотохимических исследований / Б.А. Баклаков, А.М. Батраков, В.П. Болотин и др. // 17-е совещ. по ускорит. заряд. част. Т. 2. Протвино, 2000.

Работы по запуску инфракрасного ЛСЭ в ФИАНе / В.А. Агафонов и др. // Там же.

Работа и модернизация линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН / С.К. Есин, Л.В. Кравчук, В.Л. Серов, А.В. Фещенко // Там же.

Ускорение ионов в линейном ускорителе И-100 / Ю.М. Антипов, Б.А. Фролов, Ю.П. Горин и др. // Там же.

Основанный на ускорителе источник нейтронов для нейтронозахватной терапии и терапии быстрыми нейтронами / Б.Ф. Баянов и др. // Там же.

Довбня А.Н., Дикий Н.П., Уваров В.Л. О возможности производства изотопов для ядерной медицины на ускорителе электронов // Там же.

Источник синхротронного излучения третьего поколения в ОИЯИ / Н.И. Балалыкин, П.Ф. Белошинский, В.Г. Кадышевский и др. // Атомная энергия. 2001. Т. 91. Вып. 4; Проект дубненского электронного синхротрона // Там же. Т. 1.

Куделайнен В.И., Пархомчук В.В., Смирнов Б.М. Опыт ввода в эксплуатацию установки электронного охлаждения на синхротроне SIS // Там же. Т.1.

Синхротронное излучение: Сб. статей / Под ред. Н.Г. Басова. М.: Наука, 1975.

Пархомчук В.В., Скринский А.Н. Методы охлаждения пучков заряженных частиц // ЭЧАЯ. 1981. Т. 12. Вып. 3.

Мишнев С.И. Состояние работ на установках со встречными пучками ВЭПП-2М и ВЭПП-4М ИЯФ СО РАН // 16-е совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 1. Протвино, 1998.

Высокоинтенсивный источник поляризованных электронов (физическое обоснование проекта) / В.П. Ефимов, В.В. Закутин и др. // 14-е совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 3. Протвино, 1994.

Подкритический генератор нейтронов – прототип установки для трансмутации радиоактивных отходов / А.А. Васильев, Р.М. Венгров, А.М. Козодаев и др. // 14-е совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 4. Протвино, 1994.

Излучательный комплекс для фундаментальных и прикладных исследований / К.А. Беловинцев, А.И. Букин, Е.Б. Гаскевич и др. // Там же.

Радиационно-физические комплексы на базе ускорителей: Сб. статей / Под ред. А.В. Шальнова. М.: Энергоатомиздат, 1983.

Минц А.Л. Радиотехника и ускорители заряженных частиц. М.: Наука, 1976.

Васильев С.Н., Гусев О.А., Федоров В.Т. Тенденции развития систем питания ускорителей заряженных частиц // 7-е Всесоюзное совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 1. Дубна, 1981.

Об оптимальном выборе параметров ВЧ систем протонных ускорителей и накопителей на сверхвысокие энергии / В.А. Бережной, А.А. Васильев и др. // Там же.

Милованов О.С., Пятнов Е.Г., Собенин Н.П. ВЧ системы линейных ускорителей электронов. М.: МИФИ, 1988.

Радиотехнические системы циклотронов, современное состояние и перспективы / И.Ф. Малышев, М.Ф. Ворогушин и др. // 8-е Всесоюз. совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 1. Дубна, 1983.

Богданович Б.Ю., Гаврилов Н.М., Шальнов А.В. Ускорители с накоплением и генерацией энергии. М.: Энергоатомиздат, 1994.

Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. М.: Наука, 2000.

Мирзоев К.Г., Рагозинский В.Г., Ушаков В.Л. Сверхвысокий вакуум в крупных ускорительно-накопительных комплексах // 9-е Всесоюзное совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 1. Дубна, 1985.

Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. М.: Атомиздат, 1970.

Брехна Г. Сверхпроводящие магнитные системы. М.: Мир, 1976.

Магнитотвердые регулируемые квадрупольные для фокусировки протонного пучка на мишень нейтронного генератора ИТЭФ / В.С. Скачков и др. // 16-е совещ. по ускорит. зарядж. част. Т. 2. Протвино, 1998.

Воеводин В.П. Вычислительные средства новой системы управления ускорительного комплекса У-70 // Там же. Т. 1.

Клименков Е.В. Структура прикладного программного обеспечения в системе управления комплекса У-70 // 17-е совещ. по ускорит. зарядж. част. Т. 1. Протвино, 2000.

Воеводин В.П., Клименков Е.В. Описание основных объектов системы управления комплекса У-70 // Там же.

Датчики профиля пучка для ускорительного комплекса ИФВЭ / В.Т. Баранов, В.Н. Гресь и др. // Там же.

Система мониторинга пучков заряженных частиц в каналах транспортировки / В.А. Киселев, В.Р. Козак, Э.А. Купер и др. // Там же.

Jones R. LHC beam instrumentation // Там же.

Клюшников В.А., Купцов С.И., Пелешко В.Н. Распределенная система радиационного контроля ускорительного комплекса ИФВЭ // Там же. Т.2.

Алексеев А.Г., Карпов Н.А. Результаты практического использования термомлюминесцентных детекторов на основе LiF-Mg, Cu, P в дозиметрии  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучений // Там же.

Центр протон-ионной лучевой терапии в ИФВЭ (развитие проекта) / Ю.М. Антипов, А.В. Василевский, А.П. Воробьев и др. // Там же.

Применение циклотрона МГЦ-20 Радиового института для производства изотопов / Л.М. Солин, Л.С. Лебедев и др. // Там же.

Прудников И.А., Соколов Н.И. Цилиндры Фарадея для измерения тока пучка заряженных частиц высоких энергий. Л.: НИИЭФА, 1983.

Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях: Сб. науч. трудов РАИАН. М.: 1984.

Кимель Р.Л. Физические аспекты защиты протонных ускорителей высоких энергий. М.: Атомиздат, 1976.

Зайцев Л.Н. Радиационные эффекты в структурах ускорителей. М.: Энергоатомиздат, 1987.

Дрождин А.И., Маслов М.Л., Мохов М.В. Защита сверхпроводящих магнитов от облучения на протонных ускорителях // 10-е Всесоюзное совещ. по ускорит. зарядж. част. Т. 2. Дубна, 1987.

Оценка параметров электроядерной установки для трансмутации ядерных отходов / А.А. Глазков, А.Н. Диденко, А.Д. Коляскин и др. //

16-е совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 2. Протвино, 1999.

Сильноточный циклотронный комплекс для электроядерного метода получения энергии (предложение для проектирования) / Ю.Г. Аленицкий, С.Б. Ворожцов, А.А. Глазов и др. // 17-е совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 2. Протвино, 2000.

Ускорение ионов  $C^{4+}$  в бустерном синхротроне УК ИТЭФ / Н.Н. Алексеев, П.Н. Алексеев, Б.Ю. Шарков и др. // Там же.

О работе ускорителя У-70 и модернизации его систем / А.Г. Афонин, В.П. Воеводин, М.Н. Горохов и др. // Там же.

Мызников К.П. Состояние работ по сооружению УНК // 15-е совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 1. Протвино, 1996.

#### **Дополнительная литература к разделу IV**

Рис Д.П. Стэнфордский линейный коллайдер // В мире науки. 1989. №12.

Адо Ю.М. Ускорители заряженных частиц высоких энергий // УФН. 1985. Т. 145. Вып. 1.

Майерс С., Пикассо Э. Большой электрон-позитронный коллайдер // В мире науки. 1990. № 9.

Яблоков Б.Н. Над чем работают в ускорительных центрах: Реферат // Атомная техника за рубежом. 1998. № 2.

Модернизация УНК ИТЭФ – проект «ИТЭФ-ТВН» / Д.Г. Кошкарев, Н.Н. Алексеев, И.В. Чувило, Шарков // 15-е совещ. по ускорит. заряж. част. Т. 2. Протвино, 1996.

Кошкарев Д.Г., Чуразов М.Д. Инерционный термоядерный синтез на базе тяжелоионного ускорителя-драйвера и цилиндрической мишени // Атомная энергия. 2001. Т. 91. Вып. 1.

Meshkov I.N. Catalogue of high energy accelerators. HEACC-98, JINR, Dubna, 1998.

Lazarev N.V. Brief handbook of accelerator facilities, some special terms and institutions addresses. ИТЕР-19-00, М., 2000.

***Примечание.** Специалистам как в области физико-математических, так и технических наук. Различие в специализации состоит в том, что для первых требуется проявить более глубокие знания раздела II программы, а для вторых – соответственно раздела III, разделы I и IV одинаково важны в обоих случаях.*



**Дополнительная программа – минимум кандидатского экзамена по специальности 01.04.20 «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»**

1. Технологические возможности электронных и ионных пучков в радиационных, тепловых, полупроводниковых и других процессах.
2. Технологические и научные применения синхротронного излучения. Сопоставление его возможностей с другими источниками излучения.
3. Метод рекуперации энергии пучков. Примеры применения.
4. Формирование ярких источников синхротронного излучения. Ондюляторы, клистроны.
5. Сравнение линейных и циклических встречных пучков.
6. Основные проблемы создания установки линейных встречных пучков.
7. Прохождение заряженных частиц через среду. Ионизационные и радиационные потери энергии, рассеяние.
8. Метод тонкой и сверхтонкой мишени в накопителях.
9. Источники позитронов.
10. Методы измерения поляризации электронов и позитронов в накопительных кольцах.
11. Структура и приборы для автоматизации ускорителей и накопителей.
12. Устройство сверхпроводящих магнитов.

**Основная литература**

1. В.А. Боровицын [ред.] - Теория излучения релятивистских частиц, (ФИЗМАТЛИТ, 2002)
2. А.В. Бублей и др. Электронная пушка с управляемым профилем пучка для оптимизации электронного охлаждения ионов. Журнал Вестник НГУ - Серия: Физика, Новосибирск 2007 г., том 2, выпуск 3, с.87-90.
3. В.В. Смалюк. Диагностика пучка в ускорителях заряженных частиц. Учеб.пособие. - Новосибирск, НГУ, 2008, 257 с.
4. О.В. Анчугов и др. Эксперименты по физике пучков заряженных частиц на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М, ЖЭТФ, 2009, том 136, No4, стр.690-702
5. Е.Б. Левичев, Лекции по нелинейной динамике частиц в циклическом ускорителе. Учебник, издательство НГТУ, 2009, 224 с.
6. В.В. Анашин и др. Детектор КЕДР, Препринт ИЯФ 2010-40, Новосибирск, 2010, 86 стр., <http://www.inp.nsk.su/publications>

7. А.Н. Алешаев и др. Ускорительный комплекс ВЭПП-4, Препринт ИЯФ 2011-20, Новосибир 2011, 136 стр., <http://www.inp.nsk.su/publications>

### Дополнительная литература

1. Бондарь А.Е. и др. Измерение поляризации в накопителях Института ядерной физики. Труды XII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. США, Фермилаб, 1983, с. 138.
2. Середняков С.И. и др. Изучение радиационной поляризации частиц в накопителе ВЭПП-2М. ЖЭТФ, 1976, т. 71, с. 2025.
3. Жоленц А. А. М он схематизация энергии взаимодействия частиц в накопителях. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1979, ,т. I, с. 132.
4. Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н. Использование; синхротронного излучения: состояние и перспективы. УФН, 1977, т. 122, в. 3, с. 369.
5. Винокуров Н.А., Скринский А.Н. Оптический клистрон. В кн.: Релятивистская ВЛ. электроника. Горький, 1981, с. 204.
6. Ауслендер В.Л. и др. Мощные электронные ускорители и радиационная технология. Вестник АН СССР, 1981, JS 6, с. 48.
7. Куделайнен В.И. Глубокое торможение электронного пучка в системе с продольным магнитным полем. ЖТФ, 1976, т. 46, №8, с. 1678.
8. Широков Ю.М., Длин А.И. Ядерная физика.
9. Нифонтов В.И. Автоматизированные системы контроля и управления экспериментальными физическими установками ИЯФ СО АН СССР. Докторская диссертация.1984.
10. Ионная имплантация. М./ "Металлургия", 1985. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов. М., "Радио и связь", 1984.
11. Попов С.Г. Эксперименты со внутренней мишенью на накопителях. Препринт ИЯФ, № 81-122 (на английском языке).
12. Будкер Г.И. и др. Источник позитронов для накопителя ВЭПП-4. В кн.: Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1976, М., 1977, т. I, с. 280.

## **Правила аттестации аспирантов по дисциплине**

В соответствии с учебным планом проводится экзамен В билет включены три вопроса из основной программы и два вопроса из дополнительного списка. По результатам ответа на вопросы по билету и при необходимости на дополнительные вопросы аспирант может получить следующие оценки.

**Отлично** – на все вопросы в билете даны правильные ответы, полностью раскрывающие суть вопросов, и на дополнительные вопросы, заданные комиссией аспирант ответил правильно и полностью.

**Хорошо** – на вопросы даны правильные, но не полные ответы. Раскрыта суть рассматриваемого процесса, но не приведены примеры. На дополнительные вопросы, заданные комиссией аспирант ответил правильно и полностью.

**Удовлетворительно** – только на часть из вопросов дан правильный ответ, но на дополнительные вопросы, заданные комиссией, поступающий в аспирантуру ответил правильно и полностью.

**Неудовлетворительно** – на вопросы по билету аспирант ответил неправильно.