

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра физики ускорителей**



**Рабочая программа дисциплины
ЦИКЛИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	108	32	32		22	18	2			2
Всего 108 часов / 3 зачётные единицы, из них: - контактная работа 68 часов										
Компетенции ПК-1										

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

С.В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	4
3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	5
5. Перечень учебной литературы.	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	7
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	8
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	8
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	9

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Циклические ускорители» предназначена для обучения специалистов, которые будут в своей последующей работе использовать знания об устройстве и принципе работы циклических ускорителей элементарных заряженных частиц, предназначенных для научных и промышленных целей. Данная дисциплина имеет своей целью дать профессионально подготовленным физикам информацию о принципах работы и конструкции основных компонентов современных циклических ускорителей, а также основных физических явлениях, влияющих на параметры пучков заряженных частиц.

Уникальная особенность курса «Циклические ускорители» заключается в том, что студентам передаются не только современные знания в данной области, но и весь накопленный многолетний опыт Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Поскольку институт стоит у истоков ускорительной техники, весь курс построен с учетом практических знаний, имеющихся у его коллектива. Кроме этого, студенты могут «вживую» ознакомиться со многими макетами различных ускорительных разработок, а также с действующими установками, созданными в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способность использовать специализированные знания в области физики при построении теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты. ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области. ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования	Знать основные физические явления, влияющие на параметры пучков заряженных частиц в циклических ускорителях, а также принципы работы и конструкции основных разновидностей современных циклических ускорителей. Уметь проводить расчёты движения пучков заряженных частиц и полей в элементах циклических ускорителей, необходимые для разработки и конструирования ускорителей заряженных частиц. Владеть аналитическими и численными методами расчёта и оптимизации ведущих полей и параметров пучков заряженных частиц в линейных и нелинейных магнитных структурах современных ускорительных установок.

Всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки студентов, материал лекционного курса увязывается с современными исследованиями в области физики ускорителей. Поскольку институт стоит у истоков ускорительной техники, весь курс построен с учетом практических знаний, имеющихся у его коллектива. Кроме этого, студенты могут «вживую» ознакомиться со многими макетами различных ускорительных разработок, а также с действующими установками, созданными в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Циклические ускорители» является дисциплиной вариативной части подготовки бакалавра по направлению «03.03.02 Физика» и реализуется в осеннем семестре 3-го курса кафедрой физики ускорителей. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим и математическим дисциплинам, как электродинамика, а также высшая алгебра, математический анализ, дифференциальные уравнения. Он должен предшествовать выполнению квалификационной работы бакалавра по данной специализации, т.к. дает бакалавру необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения исследовательской работы в области расчетов динамики частиц в ускорителях в рамках подготовки его квалификационной работы (Практика и научно-исследовательская работа в НИИ).

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	108	32	32		22	18	2			2
Всего 108 часов / 3 зачётные единицы, из них: - контактная работа 68 часов										
Компетенции ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: контрольные работы, задания для самостоятельного решения;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 22 часа;
- промежуточная аттестация (подготовка к промежуточной аттестации, консультации, экзамен) – 22 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, консультации, экзамен) составляет 68 часов.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Дисциплина «Циклические ускорители» представляет собой семестровый курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 5 семестре. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 3 зачётные единицы, 108 академических часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоёмкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Уравнения движения частиц в циклических ускорителях. Фокусировка в неоднородном магнитном поле.	1	6	2	2	2	
2	Устойчивость поперечного движения частиц в циклических ускорителях. Бетатронные колебания. Матрица перехода. Слабая фокусировка.	2	6	2	2	2	
3	Бетатронные колебания в периодических фокусирующих системах. Устойчивость решений уравнения Хилла, теорема Флоке. Огибающая бетатронных колебаний в жесткофокусирующем ускорителе.	3	6	2	2	2	
4	Влияние возмущений ведущего поля в циклических магнитных структурах. Искажение равновесной орбиты. Запрещенные полосы бетатронных частот.	4	6	2	2	2	
5.	Замкнутая орбита для частиц с неравновесной энергией. Коэффициент удлинения орбит, удлинение периода обращения.	5	6	2	2	2	
6.	Продольное движение частиц, резонансное ускорение, автофазировка, уравнения синхротронных колебаний.	6	5	2	2	1	
7.	Синхротронное излучение, его характеристики и влияние на динамику циркулирующих электронов. Радиационное затухание колебаний.	7	6	2	2	2	
8.	Возбуждение колебаний вследствие квантовых флуктуаций синхротронного излучения. Установившиеся размеры пучка в электронном накопителе.	8	5	2	2	1	
9.	Анализ нелинейных возмущений осциллятора методом усреднения. Нерезонансные возмущения. Хроматизм и кубическая нелинейность бетатронных колебаний.	9	4	2	2	1	
10.	Внешний (простой) резонанс ангармонических колебаний. Амплитудно-частотная характеристика,	10	5	2	2	1	

	фазовый портрет, области бетатронной автофазировки.						
11.	Параметрический резонанс, нелинейные резонансы. Амплитудно-частотная характеристика, фазовый портрет, области бетатронной автофазировки.	11	5	2	2	1	
12.	Взаимодействие встречающихся сгустков. Параметр пространственного заряда ξ .	12	5	2	2	1	
13.	Ограничение светимости встречных пучков "эффектами встречи".	13	5	2	2	1	
14.	Эффекты, определяющие время жизни пучка в накопителе.	14	5	2	2	1	
15.	Методы инжекции. Методы охлаждения протонных пучков: электронное охлаждение, стохастическое охлаждение.	15	5	2	2	1	
16.	Влияние пространственного заряда на динамику интенсивного пучка. Когерентные неустойчивости пучка, их диагностика и подавление.	16	5	2	2	1	
17.	Самостоятельная подготовка		18				18
18.	Консультации		2				2
	Экзамен		2				2
	Всего		108	32	32	22	22

Программа практических занятий (32 часа)

Занятие 1. Ускорение частиц в циклотроне. Изохронный циклотрон. Синхроциклотрон, вариация частоты ускоряющего поля в цикле. Ускорение вихревым электрическим полем, изменение радиуса орбиты при ускорении в однородном поле. Бетатрон. "Закон 2:1". (2 часа)

Занятие 2. Динамика частиц в магнитных элементах. Спектрометры на основе поворотного магнита. Матрицы линейных магнитных элементов. Примеры применения матричного формализма. Эквивалентность "толстой" линзы системе из "тонкой" линзы и пустых промежутков. Применение электростатических полей, электронная оптика на основе электростатических элементов. (2 часа)

Занятие 3. Уравнения Хилла. Решение в форме Флоке. Уравнение на огибающую и его решение на примере пустого промежутка. Расчёт структурных функций на примере одномерной FO- периодической структуры. Понятие бета-функций и бетатронных частот. Динамика частицы в фазовом пространстве. (2 часа)

Занятие 4. FOFO-структура. Двумерное поперечное движение, FODO-структура, условие одновременной устойчивости по двум степеням свободы. (2 часа)

Занятие 5. Транспортные и обратная матрицы циклического ускорителя. Параметризация Твисса. Транспортировка вектора параметров Твисса с помощью матричного формализма. (2 часа)

Занятие 6. Уравнение на бета-функцию. Матрица системы элементов, выстроенных в обратном порядке ("зеркальная матрица").(2 часа)

Занятие 7. Комплексные собственные вектора обратной матрицы. Построение транспортной матрицы по известным значениям параметров Твисса на входе в транспортный участок. (2 часа)

Занятие 8. Неидеальности магнитной структуры. Возмущение равновесной орбиты сосредоточенным и распределённым искажением магнитного поля. Резонансные условия. (2 часа)

Занятие 9. Возмущение фокусирующих полей. Сдвиг бетатронных частот. Разрушение устойчивости поперечных колебаний, "запрещённые" зоны. (2 часа)

Занятие 10. Искажение структурных функций сосредоточенным возмущением фо-

кусировки, распространение искажения в кольцо. Условие линейного сложения искажений от двух сосредоточенных возмущений. (2 часа)

Занятие 11. Движение частицы с отклонением по импульсу. Дисперсионная функция. Коэффициент удлинения орбит. Параметр проскальзывания. Расчёт дисперсионной функции в периодической FODO структуре с малым углом поворота в ячейке, но немалым набегом бетатронной фазы. (2 часа)

Занятие 12. Натуральный хроматизм бетатронных частот. Последствия и методы компенсации. Вывод полной формулы для хроматизма "малых машин". Хроматизм структурных функций, на примере азимутально-симметричного ускорителя. (2 часа)

Занятие 13. Продольная динамика частиц. Ускорение частиц в синхротроне. Принцип автофазировки. Синхротронные колебания. Гамильтонов формализм для продольного движения. Динамика в фазовом пространстве. Понятие сепаратрисы – границы зоны финитного движения. Вывод полной формулы для ширины сепаратрисы. (2 часа)

Занятие 14. Радиационное затухание в электронных синхротронах. Теорема о сумме декрементов. Связь между затуханием колебаний продольной и поперечной горизонтальной степенями свободы. Особенности радиационного "затухания" в FD-структуре. (2 часа)

Занятие 15. Коллайдеры – ускорители на встречных пучках. Понятие светимости. Эффекты встречи – взаимодействие частицы с полем встречного сгустка. Возмущение фокусировки встречным сгустком. Сдвиг частоты, динамическая бета-функция. Flip-flop эффект. (2 часа)

Занятие 16. Нормализованные переменные. Быстрые и медленные переменные; переменные действие-угол. Метод усреднения для осциллятора с малым возмущением. Примеры применения метода усреднения: сдвиг частоты, затухание, амплитудно-частотная зависимость, нелинейные резонансы. (2 часа)

Самостоятельная работа студентов (40 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	22
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

1. А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей, М., Физматгиз, 1962.(13 экз.)
2. А.Н.Лебедев, А.В.Шальнов. Основы физики и техники ускорителей, М., Энергоатомиздат, 1991., ISBN 5-283-03971-4 (1 экз)
3. Е.А.Переведенцев. Радиационные эффекты в циклических ускорителях. Учебное пособие по спецкурсу «Циклические ускорители», 2005. http://accel.inp.nsk.su/library/Perevedentsev_RadEffects.pdf

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. А.А. Коломенский и А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей. М.: Физматгиз, 1962.
2. Г.С. Ландсберг. Оптика. М.: Физматлит, 2003.

3. С.И. Молоковский и А.Д. Сушков. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используется.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Циклические ускорители» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.
2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции, а также посредством сдачи задач из задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в физике циклических ускорителей в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на дифференцированном зачете. Дифференцированный зачет проводится в конце семестра в зачетную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.	Знать основные физические явления, влияющие на параметры пучков заряженных частиц в циклических ускорителях, а также принципы работы и конструкции основных разновидностей современных циклических ускорителей.	Сдача заданий, экзамен.
ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области	Уметь проводить расчёты движения пучков заряженных частиц и полей в элементах циклических ускорителей, необходимые для разработки и конструирования ускорителей заряженных частиц.	Сдача заданий, экзамен.

<p>ПК 1.3 Выбирает наиболее эффективные методы построения теоретических моделей физических явлений и процессов в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования</p>	<p>Владеть аналитическими и численными методами расчёта и оптимизации ведущих полей и параметров пучков заряженных частиц в линейных и нелинейных магнитных структурах современных ускорительных установок.</p>	<p>Проведение контрольных работ, экзамен.</p>
--	--	---

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Циклические ускорители».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.3	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3 Типовые задания по практике, необходимые для оценки результатов обучения

1. Задания для самостоятельной работы

1. Магнитная система электронного синхротрона Б-3М (2.5–250 МэВ) состоит из 4-х одинаковых 90-градусных секторных магнитов с радиусом поворота $r_0 = 100 \text{ см}$, показатель спада $n = 0.6$, разделённых дрейфовыми промежутками длиной $L = 40 \text{ см}$. Найти бетатронные частоты ν_x, ν_z , огибающие w_x, w_z и формфакторы бетатронных колебаний β_{max}/β_{min} , адмиттансы A_x, A_z для апертуры $\pm 3 \text{ см}$, дисперсионную функцию $\eta(s)$ и коэффициент удлинения орбит α_p .
2. Какой силы тонкая квадрупольная линза, установленная в центре одного из прямолинейных промежутков Б-3М, потребуется для сдвига бетатронных частот на $\Delta\nu = 0.2$ при энергии 5 МэВ?
3. Оценить горизонтальное искажение орбиты в Б-3М при отклонении ведущего поля в одном из 4-х магнитов на 1 % от проектного значения.
4. Найти синхротронную частоту и ширину ВЧ сепаратрисы Б-3М при использовании ускоряющего напряжения $U_0 = 20 \text{ кВ}$ на 1-й гармонике частоты обращения. Каков максимально допустимый темп ускорения в этой машине?
5. Оценить радиационные потери W_0 , времена радиационного затухания колебаний τ_x, τ_z, τ_s и "установившиеся" размеры электронного пучка в магнитной системе Б-3М при энергии частиц 250 МэВ.
6. Исследовать хроматизм бетатронных частот в азимутально-симметричной магнитной системе с ведущим полем в медианной плоскости $H_z(r) = H_0(r_0/r)^n$. Сравнить со случаем линейной фокусировки: $dH_z/dr = \text{const}(r)$.
7. Показать, что $w(s) = \sqrt{\beta_0 + s^2/\beta_0}$ является огибающей пучка прямолинейных траекторий с начальными условиями $x_i = \sqrt{\varepsilon\beta_0} \cos(\phi_i), x'_i = \sqrt{\varepsilon/\beta_0} \sin(\phi_i)$. Пояснить смысл параметров β_0 и ε .
8. Исследовать вызванное эффектами встречи возмущение β -функции в месте встречи пучков в зависимости от близости к параметрическому резонансу, учитывая пространственный заряд встречного сгустка в линейном приближении ("эффект Фраскати"). Для параметров электрон-позитронного накопителя ВЭПП-2М (без змейки) найти $\xi_{x,z}, \Delta\nu_{x,z}$ и светимость на энергии 510 МэВ: $\beta_z^* = 6 \text{ см}, \beta_x^* = 40 \text{ см}, \nu_z = 3.08, \nu_x = 3.06, f_0 = 16.7 \text{ МГц}, I^+ = I^- = 15 \text{ мА}, r_0 = 122 \text{ см}, \eta^* = 40 \text{ см}$.
9. В азимутально-симметричной магнитной структуре с радиусом орбиты r_0 и показателем спада ведущего поля n установлена тонкая квадрупольная линза оптической силы P . Найти границы зон устойчивости бетатронных колебаний на плоскости $n - P$.
10. Построить матрицу перехода для участка магнитной структуры по заданным значениям параметров Твисса на входе и выходе этого участка.
11. Найти приращение фазы бетатронных колебаний на участке магнитной структуры с известной матрицей перехода с начального на конечный азимут и заданными значениями параметров Твисса на входе этого участка.
12. Вычислить декремент радиационного затухания горизонтальных бетатронных колебаний в магнитной системе типа FD при равной длине и одинаковом по величине градиенте фокусирующей и дефокусирующей секций.

Пример экзаменационного билета

1. Уравнения движения частиц в циклических ускорителях. Фокусировка в неоднородном магнитном поле.
2. Синхротронное излучение, его характеристики и влияние на динамику циркулирующих электронов. Радиационное затухание колебаний.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Циклические ускорители»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного