

**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**



УТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н
В.Е.Блинов
2022 г.

**Рабочая программа дисциплины
ЛИНЕЙНЫЕ 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
6	108	32	32		22	18	2			2
Всего 108 часа / 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. 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.	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.	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	6
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	6
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	7

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

Дисциплина «Линейные 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 «Линейные 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	<p>ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при воспроизведении учебного материала с требуемой степенью научной точности и полноты.</p> <p>ПК 1.2 Использует специализированные знания при проведении научных изысканий в избранной области.</p> <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>Знать основные физические явления, влияющие на параметры пучков заряженных частиц в линейных ускорителях, а также принципы работы и конструкции основных разновидностей современных линейных ускорителей.</p> <p>Уметь проводить расчёты движения пучков заряженных частиц и полей в элементах линейных ускорителей, необходимые для разработки и конструирования ускорителей заряженных частиц.</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>

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 «Линейные ускорители» является дисциплиной вариативной части подготовки бакалавра по направлению «03.03.02 Физика» и реализуется в весеннем семестре 3-го курса кафедрой физики ускорителей. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим и математическим дисциплинам, как электродинамика, электронная оптика, 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. 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.

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
6	108	32	32		22	18	2			2
Всего 108 часов / 3 зачётных 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, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью докладов, экзаменов.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль успеваемости: опрос по материалам предыдущей лекции, устный доклад по выбранной теме.

- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость 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 сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.
- Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые 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 «Линейные ускорители» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 6 семестре. Общая трудоёмкость дисциплины составляет 3 зачётные единицы, 108 академических часа.

№ 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.	Линейные ускорители. Ускорители прямого действия. Каскадные ускорители. Электростатические ускорители (ЭСУ). Линейные индукционные ускорители (ЛИУ). Линейные резонансные ускорители. Волноводные линейные ускорители.	1-2	10	4	4	2	
2	Замедленные волны. Фазовая и групповая скорости. Набор энергии в волноводных ускоряющих системах.	3-4	10	4	4	2	
3	Цепочка связанных резонаторов. Расчет круглого диафрагмированного волновода с малым отверстием связи.	5-6	10	4	4	2	
4	Возбуждение ускоряющих структур (УС). УС с постоянным импедансом (СЗ). УС с постоянным градиентом (СГ).	7-8	12	4	4	4	
5.	Переходные процессы. Переходной процесс в одиночном резонаторе. Система умножения мощности SLED. Возбуждение ускоряющей секции с использованием умножителя мощности SLED.	9-10	12	4	4	4	
6.	Учет нагрузки током. Нагрузка током в УС с бегущей волной (стационарный режим). Структура с постоянным импедансом. Структура с постоянным градиентом. КПД ускорителя. Фундаментальная теорема о нагрузке током для резонатора. Учет нагрузки током в УС с бегущей волной (нестационарный режим). Энергетический спектр. Уменьшение энергетического спектра.	11-12	12	4	4	4	
7.	Ускоряющие структуры для линейных ускорителей. Связанные объемные резонаторы. Щелевые элементы связи. Штыревые ускоряющие структуры. Резонаторы Н-типа.	13-14	10	4	4	2	
8	Методы исследования ускоряющих структур. Метод резонансного макета. Измерение добротности и коэффициента затухания. Измерение напряженности поля. Метод нерезонансных возмущений.	15-16	10	4	4	2	
9	Групповая консультация		2				2
10	Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену		18				18
11	Экзамен		2				2
	Всего		108	32	32	22	22

Самостоятельная работа студентов (40 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка доклада по выбранной теме	4
Изучение материала лекций, работа с литературой	16
Подготовка к экзамену	20

5. Перечень учебной литературы.

5.1. Основная литература

1. Павлов В.М. “Линейные ускорители”. Учебное пособие, Новосибирск: 1999, часть I “Ускоряющие системы”, часть II “Динамика частиц в линейных ускорителях”.
2. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. “Основы физики и техники ускорителей”. т.3. М.: Энергоатомиздат, 1983.

5.2. Дополнительная литература

1. Бурштейн Э.Л., Воскресенский Г.В. “Линейные ускорители электронов с интенсивными пучками”. М.: Атомиздат", 1969.
2. Справочник по диафрагмированным волноводам. М.: Атомиздат, 1977.

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

1. Левин Л. Теория волноводов. М.: Радио и связь, 1981.
2. Дж. Лоусон. Физика пучков заряженных частиц. «Мир», М., 1980

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 «Линейные 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 заслушивания устных докладов по выбранной теме.

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 по физике линейных ускорителей в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную 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 линейных ускорителях, а также принципы работы и конструкции основных разновидностей современных линейных ускорителей.	Проведение контрольных работ, 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 линейных ускорителей, необходимые для разработки и конструирования ускорителей заряженных частиц.	Проведение контрольных работ, экзамен.
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	Владеть аналитическими и численными методами расчёта и оптимизации ведущих полей и параметров пучков заряженных частиц в линейных и нелинейных магнитных структурах современных ускорительных установок.	Проведение контрольных работ, экзамен.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Линейные 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 задачи 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 контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

1. Задания для самостоятельной работы (подготовки доклада):

Работа в семестре включает в себя подготовку устного доклада в форме презентации о линейных ускорителях в одном из ускорительных центров мира:

1. ИЯФ СО РАН
2. GSI
3. CERN
4. Fermilab
5. SLAC
6. Riken
7. KEK
8. DESY
9. PSI
10. BNL
11. DESY
12. NICA
13. Будущие проекты.

Примерные вопросы на экзамен

1. Условия для ускорения частиц. Можно ли ускорить частицу в полом регулярном волноводе? Объяснить.
2. Временные моды волн. Мода волны, используемая для ускорения частиц: в бегущем режиме и стоячем режиме.
3. Теорема Умова-Пойтинга.
4. Как влияет поле излучения пучка на его энергию при ускорении в линейном ускорителе?
5. В чём отличие фазовой скорости от групповой скорости?
6. В чём отличие замедляющей волноводной системы от гладкого волновода?
7. Особенность работы бесконечного периодического набора связанных резонаторов.
8. Что такое ускоряющая структура с постоянным градиентом и импедансом?
9. Что означают следующие режимы работы резонатора: пересвязь, недосвязь, критическая

связь?

10. Принцип работы системы умножения мощности SLED.
11. Какие существуют способы уменьшения энергического разброса в пучке, вызванного нагрузкой тока пучка ускоряющего поля?
12. Методы измерения параметров резонаторов.

-
1. На основе модели цепочки связанных резонаторов вывести дисперсионное уравнение для бесконечной периодической ускоряющей системы, посчитать фазовую и групповую скорость в ней. Собственная частота одного резонатора, сдвиг фазы между резонаторами, период ускоряющей структуры, коэффициент связи между резонаторами.
 2. Рассчитать параметр для круглого диафрагмированного волновода с малым отверстием связи.
 3. Для ускоряющей структуры с постоянным импедансом найти приращение энергии ускоряемых частиц U , максимальное значение U_{\max} , и КПД структуры (отношение запасенной энергии СВЧ в структуре в конце импульса к первоначальной энергии импульса).
 4. Для ускоряющей структуры с постоянным градиентом найти приращение энергии ускоряемых частиц U и КПД структуры (отношение запасенной энергии СВЧ в структуре в конце импульса к первоначальной энергии импульса)
 5. Принцип работы системы умножения мощности SDED. Работа ускоряющей секции с постоянным градиентом с системой SLED.
 6. Учет нагрузки током в УС с бегущей волной (стационарный режим). КПД ускорителя, I_{\max} .
 7. Учет нагрузки током в УС с бегущей волной (нестационарный режим). Энергетический спектр и его уменьшение.

Пример экзаменационного билета

1. Теорема Умова-Пойтинга.
2. Рассчитать параметр для круглого диафрагмированного волновода с малым отверстием связи.

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

МИНОБРНАУКИ РОССИИ	
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (Новосибирский государственный университет, НГУ) Физический факультет	
ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____	
1. 2.	
Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/ (подпись)	
« ____ » _____ 20 ____ г.	

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 «Линейные 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