

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

**Физический факультет
Кафедра физики ускорителей**



**Рабочая программа дисциплины
Коллективные эффекты в динамике пучков**

Направление подготовки: **03.04.02 Физика**

Направленность (профиль): **Физика. 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	Дифференциро- ванный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	32	32		6				2	
Всего 72 часа / 2 зачётные единицы, из них: - контактная работа 66 часов										
Компетенции ПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.,

И.Б. Логащенко

Новосибирск, 2026

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.	3
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	4
5. Перечень учебной литературы.	8
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся..	8
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	8
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	9
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	9
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 «Коллективные эффекты в динамике пучков» предназначена для обучения специалистов, которые будут в своей последующей работе использовать знания о коллективных эффектах, имеющих место в ускорителях элементарных заряженных частиц, предназначенных для научных и промышленных целей. Данная дисциплина имеет своей целью дать профессионально подготовленным физикам базовую и новейшую информацию об основных физических явлениях, связанных с высокой интенсивностью пучков заряженных частиц и влияющих на их параметры.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ПК-1 Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	ПК 1.1 Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования. ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать основные физические явления, связанные с интенсивностью пучков заряженных частиц и влияющие на параметры этого пучка в ускорителях, а также принципы работы основных разновидностей устройств, подавляющих или использующих данные явления. Уметь проводить расчёты движения пучков заряженных частиц и их размеров в основных элементах ускорителей, необходимые для разработки, конструирования, и улучшения параметров ускорителей заряженных частиц. Владеть аналитическими и численными методами расчёта и оптимизации параметров пучков заряженных частиц и ведущих полей в современных ускорительных установках.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Коллективные эффекты в динамике пучков» является дисциплиной профессиональной части подготовки магистранта по направлению «03.04.02 Физика» и реализуется в осеннем семестре 1-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 и основы ускорителей.

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.

Трудоемкость дисциплины составляет: 2 зачётные единицы, 72 часа.

Форма промежуточной аттестации: 1/3 семестр – дифференцированный зачет.

№	Вид деятельности	Семестр
		1/3
1	Лекции, ч	32
2	Практические занятия, ч	32
3	Лабораторные занятия, ч	-
4	Занятия в контактной форме, ч из них	66
5	аудиторных занятий, ч	64
6	в электронной форме, ч	-
7	консультаций, час.	-
8	промежуточная аттестация, ч	2
9	Самостоятельная работа, час.	6
10	Всего, ч	72

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

Дисциплина «Коллективные эффекты в динамике пучков» представляет собой семестровый курс, читаемый для обучающихся магистратуры физического факультета НГУ. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачётные единицы, 72 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Промежуточная
			Всего	Аудиторные часы	Са м. ра бо	

				Лекции	Практически е занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Введение. Примеры коллективных эффектов. Некогерентные эффекты: эффект Тушека, многократное рассеяние в интенсивном сгустке. Эффекты встречи.	1	4	2	2		
2.	Когерентные эффекты. Поля движущегося заряда в пустоте, в идеально-проводящей круглой трубе.	2	4	2	2	1	
3.	Влияние пространственного заряда на поперечную и продольную динамику.	3	4	2	2		
4.	Индукцированные пучком поля. Wake в трубе с конечной проводимостью при $m=0$	4	4	2	2		
5.	Случай $m \geq 1$ в трубе с конечной проводимостью. Wake-функции, их общие физические свойства.	5	4	2	2	1	
6.	Импедансы, их характеристики. Примеры.	6	4	2	2		
7.	Вычисление импедансов в простой геометрии. Общие методы.	7	4	2	2	1	
8.	Неустойчивости в несгруппированных пучках. Дисперсионное соотношение.	8	4	2	2		
9.	Неустойчивости в линейных ускорителях.	9	4	2	2		
10.	Модель макрочастиц: жесткий пучок. Неустойчивость и затухание Робинсона	10	4	2	2		
11.	Неустойчивости сгустка: head-tail и сильный head-tail (TMCI) в модели макрочастиц.	11	4	2	2	1	
12.	Многосгустковые неустойчивости пучка. Когерентные колебания встречных пучков в коллайдере в модели жестких сгустков.	12	4	2	2		
13.	Искажение продольной потенциальной ямы, влияние на удлинение сгустка.	13	4	2	2		
14.	Затухание Ландау. Уравнение Власова, линеаризация. Модель «несжимаемого» сгустка.	14	4	2	2	1	
15.	Продольные моды и удлинение пучка.	15	4	2	2		
16.	Поперечные (синхробетатронные) моды. Их связь и неустойчивость.	16	4	2	2	1	
17.	Дифференцированный зачет	17	2				2
	Всего		72	32	32	6	2

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

1. **Введение.** Примеры коллективных эффектов. **Некогерентные эффекты:** эффект Тушека, многократное рассеяние в интенсивном сгустке. Введение в эффекты встречи, параметр ξ , динамическая β -функция. (2 часа)

2. **Когерентные эффекты.** Поля движущегося заряда в пустоте, в идеально-проводящей круглой трубе. Мультипольные моменты распределения заряда в пучке. (2 часа)

3. **Пространственный заряд.** Поперечные эффекты пространственного заряда: сдвиг частоты, модель вакуумной камеры в виде двух параллельных пластин, заряды и токи отражения. Продольные эффекты: продольные поля и сдвиг синхротронной частоты. (2 часа)

4. **Пучок в трубе с конечной проводимостью.** Уравнения Максвелла для трубы с конечной проводимостью, поля для осе-симметричного пучка ($m=0$), скин-слой. Распределение полей в камере после пролета пучка. (2 часа)

5. **Несимметричный пучок. Wake-функции.** Поля для несимметричного ($m>0$) пучка в трубе с конечной проводимостью. Дипольные поля --- подробно. Определение и общие свойства wake-функций. (2 часа)

6. **Импедансы связи пучка с окружающими структурами.** Определение импедансов и выражение сил, действующих на пучок. Аналогия продольного импеданса и импеданса RLC контура. Поперечный импеданс, kick-факторы. Общие свойства импедансов, модель широкополосного резонатора. (2 часа)

7. **Вычисление импедансов в простой геометрии.** Методы решения уравнений Максвелла в частотном представлении и во временном, пример для широкополосного резонатора. Обзор популярных программ для электродинамических расчетов. (2 часа)

8. **Неустойчивости в несгруппированных пучках.** Неустойчивости в несгруппированных пучках, дисперсионное соотношение. (2 часа)

9. **Неустойчивости в линейных ускорителях.** Распределение энергии в пучке, набор и потеря энергии вследствие индуцированных пучком полей. Неустойчивость BBU (Beam breakup), подавление неустойчивости БНС-затуханием. (2 часа)

10. **Модель макрочастиц. «Жёсткий» пучок.** Неустойчивость и затухание Робинсона: сдвиг частоты, оценка инкремента/декремента, объяснение через сигналы с датчиков положения пучка. (2 часа)

11. **Представление сгустка двумя макрочастицами.** Обмен ролями передней и задней макрочастиц вследствие синхротронных колебаний, полная матрица периода синхротронных колебаний, неустойчивости head-tail и TMCI (сильный head-tail): сдвиг частот и инкремент из полной матрицы периода. Синхротронные моды колебаний сгустка. (2 часа)

12. Многосгустковые неустойчивости пучка. Поперечные wake-поля в кольце, равномерно заполненном сгустками, образование коллективных мод. Усложнения расчетов для "оборванной" цепочки (с пропущенными сгустками). **(2 часа)**

13. Когерентные колебания встречных пучков в коллайдере в модели жестких сгустков. Вычисление силы со стороны встречного пучка, сдвиги частот и условия устойчивости. **(2 часа)**

14. Уравнение Власова. Вывод уравнения Власова, гамильтониан системы с продольными wake-полями, искажение потенциальной ямы и его влияние на длину сгустка. Уравнение Хайсинского **(2 часа)**

15. Затухание Ландау. Линеаризация уравнения Власова. Вывод затухания Ландау из разброса частот в пучке, влияние хроматизма. Линеаризация уравнения Власова, модель «несжимаемого» сгустка. **(2 часа)**

16. Продольные и радиальные моды. Продольные моды, их роль в удлинении сгустка. Радиальные моды для описания пучков с реалистичным поперечным распределением. **(2 часа)**

17. Поперечные моды. Рассмотрение связи синхробетатронных мод и неустойчивости ТМСИ с помощью уравнения Власова, поведение мод, способы избежать их слияния. **(2 часа)**

Программа практических занятий (32 часа)

1. Задача на динамические эффекты.
2. Задачи 1.1 и 1.3
3. Задачи 2.1, 2.2, 2.4, 2.5
4. Задача 2.10, 2.12
5. Broad-band resonator импеданс (без дифракции)
6. Задача 2.29, parasitic loss
7. Задачи 3.1, 3.2 (или 3.7, 3.8, 3.9)
8. Задачи 4.2, 4.4
9. Задача 4.6, 4.11
10. Затухание Ландау
11. Получение уравнения Власова, задача 6.2
12. Радиальные моды для более реалистичных, чем water-bag, распределений пучка: гиперболическое, гаусс.
13. Продольные моды для параболического и гауссового распределений, задачи 6.15, 6.16
14. Задача 6.20, 6.22, 6.23, 6.24.
15. Многосгустковые неустойчивости и остальное

16. Получение встречной силы. Эффекты встречи. Когерентные колебания встречных сгустков.

Номера задач по книге A.Chao [1].

Самостоятельная работа студентов (6 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям	6

5. Перечень учебной литературы.

1. A.W.Chao "Physics Of Collective Beam Instabilities In High Energy Accelerators", 1993.
2. Д.В.Пестриков «Лекции по когерентным колебаниям», уч. пособие, НГУ, 1996.
3. П.Т.Пашков «Физика пучка в кольцевых ускорителях», М., ФИЗМАТЛИТ, 2006.
4. Proc. CERN Accelerator School "Intensity Limitations", CERN-2017-006-SP, Geneva, Switzerland, 2017.

Добавлено примечание ([P1]): В библиотеке НГУ этой литературы нет!!!

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

5. N. S. Dikansky, D. V. Pestrikov "The Physics of Intense Beams and Storage Rings".
6. А.Н.Лебедев, А.В.Шальнов «Основы физики и техники ускорителей» 2-е изд., - М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. К.-Y. Ng "Physics of Intensity Dependent Beam Instabilities", World Scientific, 2006.
8. H.Wiedemann "Particle Accelerator Physics", 3rd ed., Springer, 2007.
9. A. Chao et. al "Handbook of Accelerator Physics and Engineering", 2nd ed., 2013.
10. I. Hofmann "Space Charge Physics for Particle Accelerator", GSI, 2017;
11. M. Reiser "Theory and Design of Charged Particle Beams", University of Maryland, 2008, pp. 419-598.

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 «Коллективные эффекты в динамике пучков» 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 успеваемости

Текущий контроль успеваемости 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 материала данного курса. Окончательная оценка работы студента в течение семестра

происходит в конце семестра на дифференцированный зачете. Дифференцированный зачет проводится 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. Критерии и шкалы оценивания индикаторов достижения результатов обучения отражены в Таблице 10.2.

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 решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Знать основные физические явления, связанные с интенсивностью пучков заряженных частиц и влияющие на параметры этого пучка в ускорителях, а также принципы работы основных разновидностей устройств, подавляющих или использующих данные явления.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.
ПК 1.2 Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	Уметь проводить расчёты движения пучков заряженных частиц и их размеров в основных элементах ускорителей, необходимые для разработки, конструирования, и улучшения параметров ускорителей заряженных частиц. Владеть аналитическими и численными методами расчёта и оптимизации параметров пучков заряженных частиц и ведущих полей в современных ускорительных установках.	Опрос в начале каждой лекции, дифференцированный зачет.

10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Коллективные эффекты в динамике пучков».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<u>Дифференцированный зачет:</u> – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий, – наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы.	<i>Отлично</i>

При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.	
<u>Дифференцированный зачет:</u> – самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, – точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок, – наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.	<i>Хорошо</i>
<u>Дифференцированный зачет:</u> – самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, а также затруднений при формулировке собственных суждений, – корректность применения терминов и понятий, с множественными ошибками, – наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.	<i>Удовлетворительно</i>
<u>Дифференцированный зачет:</u> – отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала, – грубые ошибки в применении терминов и понятий, – отсутствие ответов на дополнительные вопросы.	<i>Неудовлетворительно</i>

10.3 Типовые задания по практике, необходимые для оценки результатов обучения

Задания для самостоятельной работы

1. Задача 1.3
2. Задача 2.3
3. Задача 3.3
4. Задача 3.5
5. Задача 4.1
6. Задача 7.2

Номера задач по книге K.Ng [2].

Пример билета

1. Модель макрочастиц: жесткий пучок. Неустойчивость и затухание Робинсона
2. Для пучка с распределением

$$\rho(r) = \frac{2e\lambda}{\pi\hat{r}^2} (1 - r^2/\hat{r}^2),$$

где $\hat{r}$ – радиальный размер пучка и λ – линейная плотность,

- 1) Вычислите некогерентный сдвиг частоты, вызванный пространственным зарядом, в центре пучка, где он максимальный, и покажите, что коэффициент пространственного заряда $\xi_{sch} = 1$.

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.