

«

»

“ ”

“ ”

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Электронная оптика и физика пучков**

: 03.03.02 , :

: 3, : 5 6

		<b>5</b>	<b>6</b>
<b>1</b>	( )	3	3
<b>2</b>		108	108
<b>3</b>	, .	62	46
<b>4</b>	, .	36	36
<b>5</b>	, .	18	0
<b>6</b>	, .	0	0
<b>7</b>	, .	16	0
<b>8</b>	, .	2	2
<b>9</b>	, .	6	8
<b>10</b>	, .	46	62
<b>11</b>	( , , )		
<b>12</b>			

( ): 03.03.02

937 07.08.2014 ., : 25.08.2014 .

: 1, ,

( ): 03.03.02

, 4 20.06.2017

- , 3 21.06.2017

:

, . - . . . . .

:

. . . ., . - . . . . .

:

. . . .

# 1.

1.1

<b>Компетенция ФГОС: ОПК.2 способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей; в части следующих результатов обучения:</b>	
1.	
<b>Компетенция ФГОС: ОПК.3 способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач; в части следующих результатов обучения:</b>	
3.	
1.	
<b>Компетенция ФГОС: ОПК.4 способность понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности; в части следующих результатов обучения:</b>	
1.	
2.	
<b>Компетенция ФГОС: ПК.1 способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин; в части следующих результатов обучения:</b>	
7.	

# 2.

2.1

	(	
--	---	--

<b>.1. 7</b>		.
1. физические основы движения частиц в ускорителях		;
<b>.2. 1</b>		
2. основы матричной оптики		;
3. Получение основных уравнений движения из принципа наименьшего действия.		;
<b>.3. 3</b>		,
4. Основные уравнения электромагнитного поля и уравнения движения частиц		;
5. Элементы электронно-оптических систем		;
<b>.3. 1</b>		,
6. основные понятия электронной оптики		;
<b>.4. 1</b>		,
7. Оценка оптических характеристик линз с аксиальной симметрией.		;

<b>.4. 2</b>	
8.Понятия эмиттанса пучка и акцептанса канала	;
9.Основы начального формирования интенсивных потоков заряженных частиц	;
10.Нахождения фокусных расстояний электрических и магнитных линз	;

**3.**

3.1

	,	.	
<b>: 5</b>			
:			
1. - . 6 6 2 2.	0	8	1,4
2. : , ( ).	0	8	2,5
3. : 6 6 .- .6 6	0	8	4
4. “ ”	0	8	5,6
5. ,	0	4	3
<b>: 6</b>			
:			

6.		0	8	8
7.		0	8	5, 7, 8
8.		0	8	10, 3, 8
9.		0	8	2, 9
10.		0	4	7

3.2

	,			
: 5				
:				



4.

<b>: 5</b>				
1		1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	2	0
: . . . : / . . . , . . . . - . . ., 2007. - 719, [1] .: .				
2		10	20	4
: . . . : / . . . , . . . . - . . ., 2007. - 719, [1] .: .				
3		1, 10, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	24	2
: . . . : / . . . , . . . . - . . ., 2007. - 719, [1] .: .				
<b>: 6</b>				
1		1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	2	0
: . . . : / . . . , . . . . - . . ., 2007. - 719, [1] .: .				
2		10, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	30	6
: . . . : / . . . , . . . . - . . ., 2007. - 719, [1] .: .				
3		10	6	0
: . . . : / . . . , . . . . - . . ., 2007. - 719, [1] .: .				
4		10, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	24	2
: . . . : / . . . , . . . . - . . ., 2007. - 719, [1] .: .				

5.

, ( . 5.1).

5.1

	-

6.

( ),

. 6.1.

-  
15-

ECTS.

<b>: 5</b>	
<i>Контрольные работы:</i>	80
<i>Зачет:</i>	20
-	
<b>: 6</b>	
<i>Контрольные работы:</i>	60
<i>Курсовая работа:</i>	100
<i>Экзамен:</i>	40
-	

6.2

		.	/		
<b>.2</b>	1.	+	+	+	+
<b>.3</b>	3.	+	+	+	+
	1.	+	+	+	+
<b>.4</b>	1.				+
	2.				+
<b>.1</b>	7.			+	+

1

## 7.

1. Иванов А. В. Динамика заряженных частиц и интенсивных пучков в стационарных полях : учебное пособие / А. В. Иванов ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2011. - 209, [1] с. : ил. - Режим доступа: [http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2011/11\\_ivanov.pdf](http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2011/11_ivanov.pdf)

1. Голдстейн Г. Классическая механика : пер. с англ. / Г. Голдстейн. - М., 1975. - 415 с.

2. Кельман В. М. Электронная оптика / В. М. Кельман, С. Я. Явор ; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе. - Л., 1968. - 486, [1] с. : ил., табл., схемы

3. Арцимович Л. А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях : учебное пособие для физических специальностей вузов / Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов. - М., 1978. - 223, [1] с. : ил., табл., схемы

4. Капчинский И. М. Теория линейных резонансных ускорителей. Динамика частиц / И. М. Капчинский. - М., 1982. - 238, [1] с. : ил.
5. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. - М., 1966. - 456 , [] с.
6. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов / М. Д. Габович. - М., 1972. - 303, [1] с. : табл., схемы

1. Винокуров Н. А. Лекции по электронной оптике для ускорительных физиков [Электронный ресурс] / Н. А. Винокуров. – Режим доступа: <http://accel.inp.nsk.su/library/Elopt24.pdf>. – Загл. с экрана.

2. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>

3. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>

4. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>

5. ЭБС "Znanium.com" : <http://znanium.com/>

6. :

## 8.

### 8.1

1. Детлаф А. А. Курс физики : учебное пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. - М., 2007. - 719, [1] с. : ил.

### 8.2

1 Microsoft Office

2 Microsoft Windows

## 9.

1	( - ) , ,	



### 1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине Электронная оптика и физика пучков приведена в Таблице.

Таблица

Формируемые компетенции	Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки)	Темы	Этапы оценки компетенций	
			Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.)	Промежуточная аттестация (экзамен, зачет)
ОПК.2 способность использовать в профессиональной деятельности базовые знания фундаментальных разделов математики, создавать математические модели типовых профессиональных задач и интерпретировать полученные результаты с учетом границ применимости моделей	у1. уметь использовать математический аппарат для освоения теоретических основ и практического использования физических методов	<p>Элементы электронно-оптических систем. Тонкие линзы. Типы линз: квадруполи, соленоиды, литиевые и др. Их фокусные расстояния. Движение частицы в магнитной квадрупольной линзе. Матрица толстой линзы. Дублеты и триплеты, их фокусные расстояния. Движение в однородном магнитном поле (горизонтальная фокусировка поворотом). Магнит с показателем спада, его матрицы. Условие устойчивости поперечного движения в азимутально симметричном ускорителе. Краевая фокусировка. Секторный магнит и магнит с параллельными краями. Аберрации. Разложение магнитного поля около равновесной траектории. Секступольные и октупольные линзы. Компенсация хроматической аберрации секступолями. Рост эмиттанса из-за наличия аберраций. Интенсивные электронные пучки. Гидродинамическое приближение. Поперечные силы в круглом и плоском пучках. Изменение поперечных размеров ламинарного пучка в пустом пространстве. Сравнение влияния сил пространственного заряда и эмиттанса на размеры; критерии применимости гидродинамического приближения и пренебрежения силами пространственного заряда. "Провисание потенциала", энергетический разброс и предельный ток. Продольное расталкивание (случай длинного сгустка и</p>	Контрольные работы 5 и 6 семестра. Курсовая работа.	Зачет (5 семестр) вопросы 1-28. Экзамен (6 семестр) вопросы 1-20.

		<p>коротковолновой модуляции плотности). Эффективное приращение эмиттанса из-за поперечного расталкивания. Компенсация пространственного заряда пучка ионами остаточного газа. Пучок в продольном магнитном поле. Бриллюэновский поток, максимальная равновесная плотность тока. Связь поперечных степеней свободы. Косой квадруполь, поворот медианной плоскости и соленоид.</p>		
<p>ОПК.3 способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач</p>	<p>з3. знать основные законы физики, являющиеся базовыми для решения задач профессиональной деятельности</p>	<p>Элементы электронно-оптических систем. Тонкие линзы. Типы линз: квадруполь, соленоиды, литиевые и др. Их фокусные расстояния. Движение частицы в магнитной квадрупольной линзе. Матрица толстой линзы. Дублеты и триплеты, их фокусные расстояния. Движение в однородном магнитном поле (горизонтальная фокусировка поворотом). Магнит с показателем спада, его матрицы. Условие устойчивости поперечного движения в азимутально симметричном ускорителе. Краевая фокусировка. Секторный магнит и магнит с параллельными краями. Движение заряженных частиц в электромагнитном поле. Уравнение движения и его интегралы. Пучки частиц. Равновесная частица. Координатный трехгранник Серре-Френе. Параксиальное приближение. Применение матриц для описания движения. Матрицы 6x6 и 2x2. Матрицы пустого промежутка. Матрица ускоряющего зазора. "Изменение" фазового объема. Зазор с переменным напряжением. Клистронная группировка. Рост эмиттанса при прохождении через вещество. Эффективный рост эмиттанса из-за неидеальностей магнитной системы. Нормализованный эмиттанс. Яркость катода с сеткой. Эмиттанс "замагниченного" катода. Интегральные инварианты 6-мерного фазового пространства. Измерение эмиттанса. Измерение</p>	<p>Контрольные работы 5 и 6 семестра. Курсовая работа.</p>	<p>Зачет (5 семестр) вопросы 1-14. Экзамен (6 семестр) вопросы 1-7.</p>

		<p>энергетического разброса и длины сгустка. Частицы с отклоненной энергией: уравнения движения; поперечная дисперсия - элемент бхб матрицы преобразования. <math>\chi</math>-функция периодических систем. Ахроматические системы. Изменение длины траектории при поперечном отклонении частицы. Продольная дисперсия. Изохронные системы. Коэффициент уплотнения орбит. бхб матрица магнита с показателем спада.</p>		
ОПК.3	<p>у1. уметь пользоваться теоретическими основами, основными понятиями, законами и моделями физики</p>	<p>Элементы электронно-оптических систем. Тонкие линзы. Типы линз: квадруполь, солениды, литиевые и др. Их фокусные расстояния. Движение частицы в магнитной квадрупольной линзе. Матрица толстой линзы. Дублеты и триплеты, их фокусные расстояния. Движение в однородном магнитном поле (горизонтальная фокусировка поворотом). Магнит с показателем спада, его матрица. Условие устойчивости поперечного движения в азимутально симметричном ускорителе. Краевая фокусировка. Секторный магнит и магнит с параллельными краями. Матрица ускоряющего зазора. "Изменение" фазового объема. Зазор с переменным напряжением. Клистронная группировка.</p>	<p>Контрольные работы 5 и 6 семестров. Курсовая работа.</p>	<p>Зачет (5 семестр) вопросы 1-15. Экзамен (6 семестр) вопросы 8-15.</p>
ОПК.4 способность понимать сущность и значение информации в развитии современного общества, осознавать опасность и угрозу, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности	<p>у1. уметь понимать, излагать и критически анализировать базовую общезначимую информацию</p>	<p>Рост эмиттанса при прохождении через вещество. Эффективный рост эмиттанса из-за неидеальностей магнитной системы. Нормализованный эмиттанс. Яркость катода с сеткой. Эмиттанс "замагниченного" катода. Интегральные инварианты 6-мерного фазового пространства. Измерение эмиттанса. Измерение энергетического разброса и длины сгустка. Электронные пушки. Закон "трех вторых". Первеанс. Пушки Пирса. Анодная линза. Виртуальный катод. Переходные процессы в диоде. Пушки с малыми шумами тока. Электронная эмиссия и типы катодов.</p>		<p>Экзамен (6 семестр) вопросы 9-11, 16, 19.</p>

ОПК.4	у2. уметь использовать информационные технологии для решения физических задач	<p>Аберрации. Разложение магнитного поля около равновесной траектории. Секступольные и октупольные линзы. Компенсация хроматической аберрации секступолями. Рост эмиттанса из-за наличия аберраций. Интенсивные электронные пучки. Гидродинамическое приближение. Поперечные силы в круглом и плоском пучках. Изменение поперечных размеров ламинарного пучка в пустом пространстве. Сравнение влияния сил пространственного заряда и эмиттанса на размеры; критерии применимости гидродинамического приближения и пренебрежения силами пространственного заряда. “Провисание потенциала”, энергетический разброс и предельный ток. Продольное расталкивание (случай длинного сгустка и коротковолновой модуляции плотности). Эффективное приращение эмиттанса из-за поперечного расталкивания. Компенсация пространственного заряда пучка ионами остаточного газа. Пучок в продольном магнитном поле. Бриллюэновский поток, максимальная равновесная плотность тока. Пучки малой интенсивности. Преобразование фазовой плоскости в пустом промежутке, тонкой и толстой линзах. Уравнение Хилла. Описание пучка при помощи эллипса на фазовой плоскости. Параметры эллипса. Бета-функция и огибающая. Уравнение огибающей. Преобразование огибающей при прохождении системы с известной лучевой матрицей. Эмиттанс и акцептанс. Периодические системы: согласованный фазовый эллипс, акцептанс, огибающая. Распределение частиц в фазовом пространстве: ступенчатое, гауссово и Капчинского-Владимирского. Волновые гауссовы пучки. Рост эмиттанса при прохождении через вещество. Эффективный рост эмиттанса из-за</p>	Экзамен (6 семестр) вопросы 1-20
-------	---	---	-------------------------------------

		неидеальностей магнитной системы. Нормализованный эмиттанс. Яркость катода с сеткой. Эмиттанс “замагниченного” катода. Интегральные инварианты 6-мерного фазового пространства. Измерение эмиттанса. Измерение энергетического разброса и длины сгустка.		
ПК.1/НИ способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	з7. знать базовые знания по теории движения частиц в циклических ускорителях.	Движение заряженных частиц в электромагнитном поле. Уравнение движения и его интегралы. Пучки частиц. Равновесная частица. Координатный трехгранник Серре-Френе. Параксиальное приближение. Применение матриц для описания движения. Матрицы 6x6 и 2x2. Матрицы пустого промежутка.		Зачет (5 семестр) вопросы 11-12. Экзамен (6 семестр) вопросы 8-10.

## 2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по **дисциплине** проводится в 5 семестре - в форме зачета, в 6 семестре - в форме экзамена, который направлен на оценку сформированности компетенций ОПК.2, ОПК.3, ОПК.4, ПК.1/НИ.

Зачет проводится в устной форме, по билетам.

Экзамен проводится в письменной форме по тестам.

Кроме того, сформированность компетенций проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 6 семестре обязательным этапом текущей аттестации являются контрольная работа, курсовая работа. Требования к выполнению контрольной работы, курсовой работы, состав и правила оценки сформулированы в паспорте контрольной работы, курсовой работы.

В 5 семестре обязательным этапом текущей аттестации является контрольная работа. Требования к выполнению контрольной работы, состав и правила оценки сформулированы в паспорте контрольной работы.

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе учебной дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенций ОПК.2, ОПК.3, ОПК.4, ПК.1/НИ, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

### Общая характеристика уровней освоения компетенций.

**Ниже порогового.** Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы могут носить существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками.

**Пороговый.** Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

**Базовый.** Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

**Продвинутый.** Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

## Паспорт зачета

по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков», 5 семестр

### 1. Методика оценки

Зачет проводится в устной форме, по билетам. Билет формируется по следующему правилу: первый вопрос выбирается из диапазона вопросов 1-14, второй вопрос из диапазона вопросов 15-28 (список вопросов приведен ниже). В ходе экзамена преподаватель вправе задавать студенту дополнительные вопросы из общего перечня (п. 4).

### Форма билета для зачета

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Факультет ФТФ

#### Билет № 1

к зачету по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков»

---

1. Сформулируйте принцип наименьшего действия. Какие уравнения следуют из этого принципа?
2. О чем гласит теорема Лиувилля?

Утверждаю: зав. кафедрой ЭФУиУ \_\_\_\_\_ профессор, Бурдаков А.В.  
(подпись) (дата)

### 2. Критерии оценки

- Ответ на билет для зачета считается **неудовлетворительным**, если студент при ответе на вопрос не дает определений основных понятий, не способен показать причинно-следственные связи явлений, при решении задачи допускает принципиальные ошибки,  
*оценка составляет менее 5 баллов.*
- Ответ на билет для зачета засчитывается на **пороговом** уровне, если студент при ответе на вопрос дает определение основных понятий, может показать причинно-следственные связи явлений, при решении задачи допускает непринципиальные ошибки, например, \_\_\_\_\_ вычислительные,  
*оценка составляет от 6 до 10 баллов.*
- Ответ на билет для зачета засчитывается на **базовом** уровне, если студент при ответе на вопрос формулирует основные понятия, законы, дает характеристику процессов,

явлений, проводит анализ причин, условий, может представить качественные характеристики процессов, не допускает ошибок при решении задачи, *оценка составляет от 11 до 15 баллов.*

- Ответ на билет для зачета засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент при ответе на вопросы проводит сравнительный анализ подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает механизмы решения, способен представить количественные характеристики определенных процессов, приводит конкретные примеры из практики, не допускает ошибок и способен обосновать выбор метода решения задачи, *оценка составляет от 16 до 20 баллов.*

### 3. Шкала оценки

Зачет считается сданным, если сумма баллов по всем заданиям билета оставляет не менее 10 баллов (из 20 возможных).

В общей оценке по дисциплине баллы за зачет учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

### 4. Вопросы к зачету по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков»

1. Сформулируйте теоремы Остроградского-Гаусса и Стокса. Какое влияние они оказывают на формирование пучков заряженных частиц?
2. Что такое потенциал электростатического поля? Почему он может быть определен, какому уравнению он подчиняется в присутствии зарядов?
3. Сформулируйте принцип наименьшего действия. Какие уравнения следуют из этого принципа?
4. Запишите уравнение движения и лагранжиан частицы в электромагнитном поле.
5. Из каких видов движений составляется движение заряженной частицы в постоянных и однородных электрическом и магнитном полях?
6. Что такое дрейфовое движение? Какие виды дрейфов существуют?
7. Что такое критерий адиабатичности? Каково выражение для адиабатического инварианта при движении в магнитном поле?
8. Как устроена и как работает ловушка Будкера? Почему в ней частицы отражаются назад? Какой критерий выхода частицы из ловушки?
9. Что такое параксиальное разложение потенциалов и полей?
10. В каких системах применима теорема Буша? Какие величины она связывает?
11. Как получаются параксиальные уравнения движения?
12. Почему электростатические линзы всегда фокусируют?
13. Каков механизм фокусировки в аксиально-симметричной магнитной линзе?

14. Покажите, что и магнитный, и электростатический квадруполь фокусируют по одному направлению и дефокусируют по-другому.
15. Почему квадрупольный дуплет фокусирует? Когда это не так?
16. Что такое матричное описание движения? Когда оно применимо? В чем его преимущество?
17. О чем гласит теорема Лиувилля?
18. Что такое эмиттанс? Чем он отличается от аксептанса? Откуда у пучка берется эмиттанс? Причины его роста? Может ли он уменьшаться?
19. Поясните различия между эмиттансом и нормализованным, среднеквадратичным и эффективным эмиттансами.
20. Что такое уравнение Хилла? О чем гласит теорема Флоке? Каков критерий устойчивости движения в периодическом канале?
21. Что такое  $\beta$ -функция?
22. Чем отличается плоский диод от плоского конденсатора? Сравните распределение полей и потенциалов в них, объясните отличия.
23. Сформулируйте закон трех вторых. Как он связан с понятием первеанса?
24. Что такое виртуальный катод? Каковы его основные свойства?
25. Зачем для транспортировки интенсивного пучка нужно сопровождающее магнитное поле? При каком условии реализуется режим Бриллюэна?
26. Что такое пушка Пирса? Чем она отличается от диода? Что такое угол Пирса?
27. Зачем нужна сферическая пушка Пирса?
28. В чём отличие реальных электронных пушек от пушек Пирса? Что мешает увеличивать первеанс?

## Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков», 5 семестр

### 1. Методика оценки

Контрольная работа выполняется письменно, включает в себя 5 заданий, проводится по темам:

- Некоторые теоремы теории поля.
- Основные уравнения электромагнитного поля.
- Принцип наименьшего действия и основные уравнения движения.
- Движение в слабонеоднородном магнитном поле. Понятие об адиабатическом инварианте.
- Электростатические линзы и зеркала.
- Магнитные линзы.
- Принцип сильной фокусировки и квадрупольные линзы.
- Линзы с числом пар полюсов больше двух.

### 2. Критерии оценки

Каждое задание оценивается максимально в 16 баллов. Оценка за контрольную является суммой оценок за каждое задание.

Контрольная работа считается **невыполненной**, если ответы студента не полные, пробелы могут носить существенный характер, численные ответы не получены или получены с существенными ошибками, *оценка составляет менее 20 баллов*.

Работа выполнена на **пороговом** уровне, если ответы студента недостаточно полные, но пробелы не носят существенного характера, численные ответы получены с незначительными ошибками, *оценка составляет от 21 до 40 баллов*.

Работа выполнена на **базовом** уровне, если ответы студента достаточно полные, но не всегда сформулированы достаточно точно, некоторые численные ответы могут содержать незначительные ошибки, *оценка составляет от 41 до 60 баллов*.

Работа считается выполненной на **продвинутом** уровне, если ответы студента полные, и все формулировки даны точно, численные ответы получены верно, *оценка составляет от 61 до 80 баллов*.

### 3. Шкала оценки

Выполнение контрольной работы на оценку не ниже 40 баллов (из 80 возможных) является обязательным условием допуска к зачету по дисциплине.

### 4. Пример варианта контрольной работы

1. Пусть в плоскости  $z = 0$  лежит диск радиуса  $R$ , потенциал которого  $U = U_0 = const$ , потенциал остальной части этой плоскости  $U = 0$ . Найти потенциал вдоль оси диска.
2. Определить максимальное время жизни пучка электронов в тороидальном соленоиде радиусом  $R = 1$  м, создающем поле на оси  $B_0 = 10$  кГс. Радиус вакуумной трубы  $r_0 = 1$  см. Энергия электронов  $W = 100$  кэВ. Сколько оборотов успеют сделать частицы?

3. Найти матрицу преобразования тонкой иммерсионной линзы, если известны фокусные расстояния –  $f_1$  и  $f_2$ .
4. Через катушку с числом витков  $N = 10$  пропускается ток  $I = 50$  А. Приблизённо катушка представляет собой тонкий виток с радиусом  $r_0 = 10$  см. Найти фокусное расстояние для пролетающих сквозь неё электронов с кинетической энергией  $W = 50$  кэВ.
5. Рассчитать градиент поля идеальной магнитной квадрупольной линзы, если известно, что расстояние между двумя противоположными полюсами равно  $2d$ . Ток в обмотках  $I$ , число обмоток  $N$ .

## Паспорт экзамена

по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков», 6 семестр

### 1. Методика оценки

Экзамен проводится в письменной форме по тестам. Тест включает в себя 10 вопросов. В ходе экзамена преподаватель вправе задавать студенту дополнительные вопросы из общего перечня (п. 4).

### Форма экзаменационного теста

- Сформулируйте принцип наименьшего действия.
- Что является адиабатическим инвариантом движения заряженной частицы в магнитном поле:
  - $p_{\parallel}^2 B \approx \text{const}$  ;
  - $p_{\perp}^2 B \approx \text{const}$  ;
  - $p_{\perp}^2 / B \approx \text{const}$  .
- Теорема Буша гласит, что при движении заряженной частицы
  - в плоскопараллельном поле ее импульс не изменяется;
  - в аксиально-симметричном поле существует интеграл движения, связывающий ее момент импульса и поток магнитного поля;
  - в аксиально-симметричном поле существует интеграл движения, связывающий ее импульс и поток электрического поля.
- Фокусирующее действие тонкой электростатической линзы основано на том, что
  - электрическое поле всегда направлено к оси;
  - электрическое поле всегда направлено от оси;
  - частица в фокусирующем поле проводит больше времени, чем в дефокусирующем.
- Квадрупольная линза:
  - фокусирует по обоим поперечным направлениям;
  - дефокусирует по обоим поперечным направлениям;
  - фокусирует по одному поперечному направлению и дефокусирует по другому.
- Напишите уравнения Гамильтона.
- Эмиттанс это
  - деленный на  $\pi$  объем пучка в фазовом пространстве;
  - деленная на  $\pi$  площадь, занимаемая пучком на плоскости  $x$  и  $P_x$  ;
  - деленная на  $\pi$  площадь, занимаемая пучком на плоскости  $x$  и  $x'$  .
- Первеанс это
  - $IU$  ;
  - $I/U$  ;
  - $I/U^{3/2}$  .

## 9. Какими свойствами обладает функция Флоке:

- она является периодической;
- ее модуль – периодическая функция, а фаза увеличивается на  $\mu$  при сдвиге на период;
- ее фаза – периодическая функция, а модуль увеличивается на  $\mu$  при сдвиге на период.

## 10. Угол Пирса равен

- $90^\circ$ ;
- $67.5^\circ$ ;
- $45^\circ$ .

## 2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный билет считается **неудовлетворительным**, если студент верно ответил на 4 и менее вопросов теста, *оценка составляет менее 10 баллов*.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **пороговом** уровне, если студент верно ответил на 5 – 6 вопросов теста, *оценка составляет от 11 до 20 баллов*.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **базовом** уровне, если студент верно ответил на 7 – 8 вопросов теста, *оценка составляет от 21 до 30 баллов*.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент верно ответил на 9 – 10 вопросов теста, *оценка составляет от 31 до 40 баллов*.

## 3. Шкала оценки

Экзамен считается сданным, если сумма баллов по всем заданиям билета оставляет не менее 20 баллов (из 40 возможных). В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

## 4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков»

1. Сформулируйте принцип наименьшего действия.
2. Что является адиабатическим инвариантом движения заряженной частицы в магнитном поле:

- d.  $p_{\parallel}^2 B \approx \text{const}$  ;
- e.  $p_{\perp}^2 B \approx \text{const}$  ;
- f.  $p_{\perp}^2 / B \approx \text{const}$  .

## 3. Теорема Буша гласит, что при движении заряженной частицы

- d. в плоскопараллельном поле ее импульс не изменяется;
- e. в аксиально-симметричном поле существует интеграл движения, связывающий ее момент импульса и поток магнитного поля;
- f. в аксиально-симметричном поле существует интеграл движения, связывающий ее импульс и поток электрического поля.

## 4. Фокусирующее действие тонкой электростатической линзы основано на том, что

- d. электрическое поле всегда направлено к оси;
- e. электрическое поле всегда направлено от оси;
- f. частица в фокусирующем поле проводит больше времени, чем в дефокусирующем.

## 5. Квадрупольная линза:

- d. фокусирует по обоим поперечным направлениям;
- e. дефокусирует по обоим поперечным направлениям;

f. фокусирует по одному поперечному направлению и дефокусирует по другому.

6. Напишите уравнения Гамильтона.

7. Эмиттанс это

- d. деленный на  $\pi$  объем пучка в фазовом пространстве;
- e. деленная на  $\pi$  площадь, занимаемая пучком на плоскости  $x$  и  $P_x$ ;
- f. деленная на  $\pi$  площадь, занимаемая пучком на плоскости  $x$  и  $x'$ .

8. Первеанс это

- d.  $IU$ ;
- e.  $I/U$ ;
- f.  $I/U^{3/2}$ .

9. Какими свойствами обладает функция Флоке:

- d. она является периодической;
- e. ее модуль – периодическая функция, а фаза увеличивается на  $\mu$  при сдвиге на период;
- f. ее фаза – периодическая функция, а модуль увеличивается на  $\mu$  при сдвиге на период.

10. Угол Пирса равен

- d.  $90^\circ$ ;
- e.  $67.5^\circ$ ;
- f.  $45^\circ$ .

11. Напишите уравнения Эйлера-Лагранжа.

12. Дрейф частицы в слабо неоднородном магнитном поле это

- a. быстрое движение ведущего центра вращения по ларморовской окружности вдоль силовой линии магнитного поля;
- b. медленное движение ведущего центра вращения по ларморовской окружности вдоль силовой линии магнитного поля;
- c. медленное движение ведущего центра вращения по ларморовской окружности вбок от силовой линии магнитного поля.

13. Параксиальные уравнения движения это:

- a. уравнения движения частицы в однородном поле;
- b. линеаризованные уравнения движения частицы вблизи оси системы;
- c. уравнения движения частицы в периодическом поле.

14. Тонкая аксиально-симметричная магнитная линза:

- a. всегда фокусирует заряженные частицы;
- b. всегда дефокусирует заряженные частицы;
- c. при малой величине поля происходит фокусировка, а при большой величине – дефокусировка частиц.

15. Дуплеты квадрупольных линз применяются

- a. для усиления действия линз;
- b. для обеспечения фокусировки по обоим поперечным направлениям;
- c. для улучшения линейности движения (уменьшения аберраций).

16. Сформулируйте теорему Лиувилля.

17. Теорема Флоке гласит, что:

- a. движение частиц в периодических полях всегда устойчиво;
- b. решения уравнения Хилла являются периодическими функциями;
- c. существует два линейно-независимых решения уравнения Хилла, обладающих свойством 
$$\Phi(z + S_0) = \lambda \Phi(z).$$

18. По какой формуле определяется среднеквадратичный эмиттанс:

- a.  $\epsilon_{r.m.s.} = \langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle$ ;
- b.  $\epsilon_{r.m.s.} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle}$ ;

с.  $\varepsilon_{r.m.s.} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$ .

### 19. Виртуальный катод это

- a. дополнительный катод в многокатодной системе;
- b. анод, находящийся под потенциалом катода;
- c. нулевая эквипотенциаль, на которой происходит остановка частиц.

### 20. Сферическая пушка Пирса представляет собой

- a. пушку, катод которой является сферическим и эмиссия идет со всей сферы;
- b. пушку, катод которой является сферическим и эмиссия идет с части сферы;
- c. пушку, катод которой является частью сферы, а форма фокусирующего электрода подобрана для обеспечения равномерности плотности тока и прямолинейности траекторий частиц.

## Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков», 6 семестр

### 1. Методика оценки

- Контрольная работа выполняется письменно, включает в себя 5 заданий, проводится по темам:
- Теорема Лиувилля и поперечный фазовый объем пучка. Понятие эмиттанса пучка и аксептанса канала.
- Движение в периодическом канале и проблема устойчивости.
- Уравнения Хилла, функции Флоке и построение огибающих потока.
- Согласование эмиттанса пучка и аксептанса канала.
- Основные эффекты объемного заряда и соотношение подобия.
- Расширение потока под действием сил пространственного заряда.
- Распределение потенциала в потоке и предельный ток ("виртуальный" катод).
- Начальное формирование электронных потоков электростатическим полем. Оптика Пирса.

### 2. Критерии оценки

Каждое задание оценивается максимально в 12 баллов. Оценка за контрольную является суммой оценок за каждое задание.

Контрольная работа считается невыполненной, если ответы студента не полные, пробелы могут носить существенный характер, численные ответы не получены или получены с существенными ошибками, оценка составляет менее 15 баллов.

Работа выполнена на пороговом уровне, если ответы студента недостаточно полные, но пробелы не носят существенного характера, численные ответы получены с незначительными ошибками, оценка составляет от 16 до 30 баллов.

Работа выполнена на базовом уровне, если ответы студента достаточно полные, но не всегда сформулированы достаточно точно, некоторые численные ответы могут содержать незначительные ошибки, оценка составляет от 31 до 45 баллов.

Работа считается выполненной на продвинутом уровне, если ответы студента полные, и все формулировки даны точно, численные ответы получены верно, оценка составляет от 46 до 60 баллов.

### 3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

Выполнение контрольной работы на оценку не ниже 30 баллов (из 60 возможных) является обязательным условием допуска к экзамену по дисциплине.

### 4. Пример варианта контрольной работы

1. Пусть пучок имеет на фазовой плоскости гауссово распределение с параметрами  $\alpha$ ,

- $\beta$ ,  $\gamma$ , и  $\varepsilon$ . Доказать, что нормировочный множитель равен  $A = \frac{1}{2\pi\varepsilon}$ . Найти распределение плотности  $\rho(x)$ . Найти, какая часть пучка проходит через щелевую диафрагму шириной  $2\sqrt{\varepsilon\beta}$ .
2. На расстоянии  $z_0$  от кроссовера пучка с эмиттансом  $\varepsilon \neq 0$  расположена фокусирующая линза. Найти такое её фокусное расстояние, чтобы огибающая пучка сразу после линзы была параллельна оси  $z$ . В кроссовере пучок имеет размер  $2x_0$ , на фазовой плоскости он образует эллипс.
  3. Показать, что след матрицы перехода на один период  $M(z | z + S_0)$  не зависит от  $z$ .
  4. Вывести приближённую формулу для предельного тока релятивистского пучка в круглой вакуумной камере. Известны радиусы пучка и камеры, потенциал камеры. Считать, что расплывание пучка полностью подавлено большим продольным магнитным полем. Указание: вывести эту формулу относительно  $\gamma_0$  – релятивистского фактора, соответствующего потенциалу камеры. Считая, что потенциал (и, соответственно, релятивистский фактор) в пучке возрастает по радиусу квадратично, выразите ток пучка через  $\gamma$  на оси и найдите максимум этой функции.
  5. Найти время пролёта эмитированного электрона в плоском диоде от катода до анода. Расстояние между катодом и анодом  $d$ , разность потенциалов  $U_0$ . Начальной тепловой скоростью пренебречь. Сравнить со случаем плоского конденсатора.

## Паспорт курсовой работы

по дисциплине «Электронная оптика и физика пучков», 6 семестр

### 1. Методика оценки.

Задание на выполнение курсовой работы представляет собой исследовательскую работу по предложенным на выбор темам:

- Абберации линз с аксиальной симметрией.
- Движение в слабонеоднородном магнитном поле. Понятие об адиабатическом инварианте.
- Движение в периодическом канале и проблема устойчивости.
- Согласование эмиттанса пучка и аксептанса канала.

Структура курсовой работы должна включать:

- введение (*во введении приводится обоснование актуальности темы, цели и задачи*);
- теоретическую часть;
- практическую часть;
- заключение (*в заключении приводятся основные выводы*).

Рекомендуются следующие этапы выполнения и защиты курсовой работы:

- глубокое ознакомление с заданной темой, изучение дополнительной литературы;
- полное выполнение необходимых теоретических выкладок;
- практическое исследование заданной темы, как правило, при помощи программы MathCAD или программы, написанной самостоятельно в какой-либо среде программирования;
- формирование итогов работы;
- оформление курсовой работы и ее защита.

В ходе защиты курсовой работы оцениваются полнота исследования предложенной темы, правильность теоретических выкладок и численных расчетов, корректность сделанных заключений.

### 2. Критерии оценки.

- Работа считается **не выполненной**, если курсовая работа не оформлена или отсутствуют необходимые структурные части, *оценка составляет от 0 до 49 баллов*.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если разделы курсовой работы не освящены в полном объеме, нарушена композиционная связь, имеются ошибки в результатах практического исследования, *оценка составляет от 50 до 72 баллов*.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если разделы курсовой работы освящены в полном объеме, но с небольшими неточностями, которые носят не существенный характер, *оценка составляет от 73 до 86 баллов*.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если разделы курсовой работы освящены в полном объеме, результаты практического исследования и заключение являются исчерпывающими, к стилю изложений не было высказано замечаний, *оценка составляет от 87 до 100 баллов*.

### 3. Шкала оценки.

В общей оценке по дисциплине баллы за работы учитываются в соответствии с правилами

балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

Выполнение курсовой работы на оценку не ниже 50 баллов (из 100 возможных) является обязательным условием допуска к экзамену по дисциплине.

**4. Примерный перечень тем курсового проекта (работы).**

- Исследование влияния нелинейных эффектов на динамику пучка заряженных частиц в ФО канале.
- Исследование и оптимизация динамики протонного пучка в периодическом квадрупольном канале.
- Рассмотрение движения заряженной частицы в неоднородном азимутальном магнитном поле.
- Уравнение Матъе и функции Флоке.
- Исследование сферической аберрации в магнитных линзах.

**5. Перечень вопросов к защите курсового проекта (работы).**

Список вопросов подготовлен для темы номер 1 в предыдущем списке:

1. Обоснуйте выбор метода учета нелинейности оптической системы.
2. Опишите получение бета-функции в идеальном канале.
3. Как должен соотноситься максимально достижимый среднеквадратичный эмиттанс с эффективным эмиттансом?
4. Что будет при усилении нелинейности?
5. В каких установках наблюдаются изученные эффекты?