

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Введение в физику электронных пучков
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра физики высоких плотностей энергии
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: В.П. Шумилин, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высоких плотностей энергии 04.06.2020

## Аннотация

В рамках данного курса слушатель получит основные сведения о физике сильноточных электронных пучков. Речь идёт об электронных пучках, большую роль в которых играет пространственный заряд составляющих пучок частиц. С этой точки зрения рассмотрена задача о токе Альфвена, модели плоского электронного потока (закон трех вторых), биполярный диод, нескомпенсированный тонкий пучок в трубе дрейфа (предельный ток Бурсиана), задача Пирса об устойчивости полностью компенсированного электронного потока.

Рассмотрен вопрос о термоэлектронной эмиссии чистых металлов, эффект Шоттки, автоэлектронная (холодная) эмиссия. Рассматриваются геометрические характеристики цилиндрических сильноточных электронных пучков (равновесный радиус, длина самофокусировки). В рамках двухжидкостной магнитогидродинамической теории рассмотрена теория пинча Беннета.

Лекции в данном курсе совмещаются с семинарскими занятиями. При этом лектор делает основной упор на качественные методы решения физических задач.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Изучение основ физики электронных пучков.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области физики электронных пучков;
- приобретение теоретических знаний в области изучения свойств электронных пучков;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области физики электронных пучков;
- приобретение навыков работы в сфере изучения электронных пучков.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты

ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;  
порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;  
современные проблемы физики, химии, математики;  
явления, рассматриваемые физикой электронных пучков;  
экспериментальные основы физики электронных пучков.

уметь:

абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
видеть в технических задачах физическое содержание;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;  
получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;  
самостоятельно формулировать и успешно решать задачи, связанные с физикой электронных пучков.

владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
культурой постановки и моделирования физических задач;  
навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;  
навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами электронных пучков.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Генерация электронных пучков.	10	10		15
2	Равновесные конфигурации электронных пучков.	10	10		15
3	Волны и неустойчивости в пучках.	10	10		15
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 2 (Весенний)

###### 1. Генерация электронных пучков.

Понятие пучка. Основные применения.

Термоэлектронная эмиссия чистых металлов. Теория Ричардсона-Дешмана. Работа выхода. Эффект Шоттки. Холодная эмиссия. Теория Фаулера-Нордгейма. Взрывная эмиссия.

Пространственный заряд в диодном промежутке. Закон  $3/2$  Чайльда-Ленгмюра. Биполярный диод. Релятивистский диод. Влияние геометрии диода. Первеанс.

###### 2. Равновесные конфигурации электронных пучков.

Уравнение огибающей. Теорема Буша. Бриллюэновский поток. Иммерсионный катод.

Цилиндрический пучок. Нейтрализующий ионный фон. Геометрические свойства самофокусирующегося электронного пучка. Равновесный радиус. Длина самофокусировки. Бессилового пучок.

Неламинарные пучки. Эмиттанс.

Пинч Беннета. Беннетовское распределение в электронных пучках.

Вероятность ионизации газа сильноточным электронным пучком. Эффект выгорания.

###### 3. Волны и неустойчивости в пучках.

Плоский электронный поток. Короткозамкнутый диод. Аперiodическая неустойчивость. Задача Бурсиана. Задача Пирса.

Альфвеновский ток компенсированного электронного пучка.

Критические токи в пространстве дрейфа.

Пучковая неустойчивость. Кинетическая теория пучковой неустойчивости. Затухание Ландау.

Излучение электромагнитных волн заряженными частицами.

#### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

#### 6. Перечень рекомендуемой литературы

##### Основная литература

1. Динамика пучков в плазме [Текст]/М. В. Незлин, -М., Энергоиздат, 1982
2. Интенсивные электронные пучки: физика, техника, применение [Текст]/Е. А. Абрамян, Б. А. Альтеркоп, Г. Д. Кулешов, -М., Энергоатомиздат, 1984
3. Мощные ионные пучки [Текст]/В. М. Быстрицкий, А. Н. Диденко, -М., Энергоатомиздат, 1990
4. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. - М.: Атомиздат, 1977.
5. Рухадзе А.А., и др. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. - М.: Атомиздат, 1980.
6. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. - М.: Мир, 1960.
7. Девидсон Р. Теория заряженной плазмы. - М.: Мир, 1978.

##### Дополнительная литература

1. Генерирование мощных наносекундных импульсов [Текст]/Г. А. Месяц, -М., Советское радио, 1974

2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. - М.: Наука, 1964.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. - М.: Наука, 1973.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - М.: Наука, 1982.
5. Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. т.1, Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Атомиздат, 1975.
6. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. - М.: Наука, 1976.

#### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

<http://users.gazinter.net/fakel/> - Сайт "Федеральное космическое агентство. ФГУП ОКБ "ФАКЕЛ".

[http://faki.fizteh.ru/index/life\\_news/n\\_47buln/](http://faki.fizteh.ru/index/life_news/n_47buln/) - Сайт "МФТИ. Факультет аэрофизики и космических исследований (ФАКИ)"

#### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

В процессе самостоятельной работы обучающихся рекомендуется использование программных средств Maple.

#### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач. При решении задач каждое действие необходимо аргументировать, ссылаясь на известные теоретические сведения.

Экзамен, как и лекции, проходит в форме свободного общения преподавателя и студентов.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Общая и прикладная физика  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
кафедра физики высоких плотностей энергии  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** В.П. Шумилин, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в физику электронных пучков» обучающийся должен:

### знать:

фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;  
порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;  
современные проблемы физики, химии, математики;  
явления, рассматриваемые физикой электронных пучков;  
экспериментальные основы физики электронных пучков.

### уметь:

абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;  
пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;  
делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;  
производить численные оценки по порядку величины;  
делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;  
видеть в технических задачах физическое содержание;  
осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики;  
получать наилучшие значения измеряемых величин и правильно оценить степень их достоверности;  
самостоятельно формулировать и успешно решать задачи, связанные с физикой электронных пучков.

### владеть:

навыками освоения большого объема информации;  
культурой постановки и моделирования физических задач;  
навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными;  
практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач;  
навыками теоретического анализа реальных задач, связанных со свойствами электронных пучков.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Введение в физику электронных пучков» осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

Перечень контрольных вопросов:

1. Этапы становления физики плазмы.
2. Вольтамперная характеристика диода, биполярного диода. Эффект Шоттки.
3. Диапазон параметров интенсивных электронных пучков.
4. Термоэлектронная эмиссия.
5. Оценить влияние электрического поля на работу выхода термокатода.
6. За что Резерфорд, Леннарт, Астон, Ленгмюр получили Нобелевскую премию.
7. Холодная эмиссия.
8. Достижения и ограничения классической электродинамики.
9. Оценить скорость перемещения солнечного зайчика по поверхности Луны, если на Земле зеркало двигает человек своей собственной силой. Оценить минимально регистрируемое звуковое давление, если микрофон ловит зайчик, отраженный от оконного стекла с расстояния 1 км.
10. Закон трех вторых.
11. Биполярный диод.
12. Геометрические свойства скомпенсированного электронного пучка: длина самофокусировки, равновесный радиус.
13. Электростатическая неустойчивость скомпенсированного электронного потока (задача Пирса).
14. Предельный ток стационарного электронного пучка в трубе дрейфа (задача Бурсиана).

Примеры контрольных заданий:

1. Оценить скорость перемещения солнечного зайчика по поверхности Луны, если на Земле зеркало двигает человек своей собственной силой. Оценить минимально регистрируемое звуковое давление, если микрофон ловит зайчик, отраженный от оконного стекла с расстояния 1 км.
2. По длинному проводнику протекает ток 5 ампер. Какое магнитное поле этот ток создает на расстоянии 1 см от проводника? Ответ выразить в гауссах.

Примеры экзаменационных билетов (заданий, тестов и др. материалов, используемых для проведения зачета, экзамена):

Вопрос. За что Резерфорд, Леннарт, Астон, Ленгмюр получили Нобелевскую премию.

Задание. По длинному проводнику протекает ток 5 ампер. Какое магнитное поле этот ток создает на расстоянии 1 см от проводника? Ответ выразить в гауссах.

Критерии оценивания



оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту, если он знает материал, грамотно и по существу излагает его, но допускает в ответе или в решении задач неточности;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, показавшему недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач;

оценка «неудовлетворительно (1)» выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться любой литературой и интернетом.