

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный
институт высоких температур Российской академии наук
(ОИВТ РАН)

Принято на Ученом совете
ОИВТ РАН
Протокол №3 от 11.06.20225

«Утверждаю»

Директор ОИВТ РАН
академик Петров О.Ф.

« 11 » июня 2025 год

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Дисциплины

«Физические свойства плазмы»

направление подготовки: **01.06.01 Математика и механика**
(специальность – 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы)

Квалификация

Исследователь. Преподаватель-исследователь

Москва
2025

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины «Физические свойства плазмы» является изучение базовых свойств плазмы как одного из видов агрегатного состояния вещества с дальнедействующим кулоновским взаимодействием между заряженными компонентами плазмы.

Задачами данного курса являются:

- формирование представления о плазме в природе и лаборатории, как об отдельном агрегатном состоянии, изложение базовых понятий о плазме, таких как плазменная частота, экранировка зарядов, влияние слабых кулоновских воздействий на процессы переноса в плазме;
- изучение влияния на плазму постоянных и импульсных электрических и магнитных полей;
- рассмотрение возникновения волн и неустойчивостей в плазме;
- рассмотрение примеров низкотемпературной плазмы в газовых разрядах разных типов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП АСПИРАНТУРЫ

Дисциплина «Физические свойства плазмы» базируется на дисциплинах: молекулярная физика, введение в физику плазмы и в статистическую физику. Также указанная дисциплина существенно опирается на навыки математического анализа и линейной алгебры, дифференциальной геометрии, аппарата уравнений математической физики.

3. УРОВЕНЬ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Подготовка научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре.

4. ГОД И СЕМЕСТР ОБУЧЕНИЯ

Второй год, третий семестр обучения.

5. ОБЪЁМ УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ И ВИДЫ ОТЧЁТНОСТИ.

Вариативная часть, в т.ч. :	<u>5</u> зач. ед.
Лекции	<u>36</u> часа
Практические занятия	<u>54</u> часа
Лабораторные работы	<u>нет</u>
Индивидуальные занятия с преподавателем	<u>нет</u>
Самостоятельные занятия	<u>90</u> часов
ВСЕГО	5зач. ед., 180 часов

6. КОНКРЕТНЫЕ ЗНАНИЯ, УМЕНИЯ И НАВЫКИ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В результате освоения дисциплины «Физические свойства плазмы» обучающийся должен

1. Знать:

- базовые понятия и законы физики плазмы (плазменная частота, электронейтральность, плазменная экранировка, неизотермическая плазма, амбиполярная диффузия, кулоновское рассеяние, уравнение Саха, расходимость статистической суммы и методы ее ограничения, проводимость плазмы);
- порядки численных величин, характерные для различных плазменных объектов;
- направленное и хаотическое движение частиц в плазме, потери импульса при взаимодействии с нейтральными и заряженными частицами;
- основные каналы рождения и гибели заряженных частиц;
- основные виды волн и неустойчивостей в плазме;
- электрический пробой низкотемпературной плазмы в газовых разрядах разных типов.

2. Уметь:

- производить численные оценки плазменной частоты, длины дебаевской экранировки, степени ионизации в равновесной изотермической плазме, частот рекомбинации и ионизации, длины пробега для потери начального импульса;
- абстрагироваться от несущественного при моделировании физических процессов в плазме, правильно учитывать вклад основных процессов ионизации и потерь заряженных частиц;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных и технологических задач.

3. Владеть:

- Методами расчета степени ионизации в изотермической плазме на основе уравнения Саха;
- методами расчета длин свободного пробега и потери импульса;
- методами расчета электропроводности слабоионизованной и полностью ионизованной плазмы,;
- методами нахождения дисперсионных уравнений для волн и инкрементов неустойчивостей для колебаний;
- навыками постановки физических задач в области физики плазмы.

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**Структура дисциплины****Перечень разделов дисциплины и распределение времени по темам:**

№ темы и название	Количество часов
1. Общие понятия о плазме. Элементарные процессы в плазме	54
2. Кинетическое и гидродинамическое приближения в плазме. Пробой в газах.	82
3. Неустойчивости в плазме	44
ВСЕГО (часов)	180

Вид занятий**Лекции:**

№	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
---	------	------------------------------------

п.п.		
1	Введение. Понятие плазмы. Плазма в природе и лаборатории. Плазменная частота. Экранировка зарядов и дебаевская длина экранирования (Теория Дебая-Хюккеля). Идеальность плазмы, критерии неидеальности. Диаграмма состояний плазмы в различных условиях. Классификация плазмы: высоко- и низко-температурная, изотермическая, разрядная и т.д. Примеры плазмы. Генераторы плазмы.	2
2	Изотермическая (равновесная) плазма. Уравнение Саха. Расходимость статистических сумм атома, методы ограничения статистических сумм в плазме. Снижение потенциала ионизации.	2
3	Элементарные процессы в плазме. Понятие сечения. Упругие столкновения частиц, частота упругих соударений и транспортная частота. Неупругие столкновения. Возбуждение, метастабильные частицы. Диссоциация. Резонансная перезарядка. Ионизация электронным ударом. Ионизационные процессы при столкновении атомов и молекул в основном и возбужденном состояниях, реакция Пеннинга, ассоциативная ионизация. Ступенчатая ионизация атома электронным ударом. Фотоионизация.	2
4	Парная рекомбинация положительного и отрицательного ионов. Прилипание электрона. Диссоциативная рекомбинация электрона и молекулярного иона. Тройная рекомбинация электронов и ионов. Тройная рекомбинация положительных и отрицательных ионов в газе. Кинетические уравнения образования и гибели. Уравнение диффузии.	2
5	Кулоновские столкновения. Кулоновский логарифм. Кулоновское сечение и частота потери направленного импульса. Время максвеллизации и выравнивания энергии в при электрон-электронных и электрон-ионных взаимодействиях.	3
6	Два различных подхода при рассмотрении плазмы: плазма как система взаимодействующих частиц и плазма как сплошная проводящая среда. Основные модели плазмы: кинетическая и гидродинамическая. Двухжидкостная гидродинамическая модель. Примеры применения гидродинамической модели, вывод плазменных колебаний, поляризации плазмы, диэлектрической проницаемости.	2
7	Плазма во внешнем электрическом поле. Движение электронов и ионов в газе во внешних полях. Дрейф и подвижность электронов и ионов в постоянном электрическом поле. Электропроводность частично и полностью ионизованной плазмы. Средняя энергия электронов в газе, находящемся во внешнем поле. Неизотермическая плазма. Баланс энергий в плазме. Свободная и амбиполярная диффузия заряженных частиц.	4
8	Плазма как проводящая жидкость. "Вмороженность"	4

	магнитного поля в плазму. Дрейф в скрещенных полях. Диффузия магнитного поля в плазме. Волновые свойства плазмы. Альфвеновские волны и магнитный звук. Прохождение поперечных электромагнитных волн через плазму, явление “отсечки”.	
9	Ионизационное размножение, лавина. Электрический пробой газов. Таунсендовский механизм пробоя, ионизационные коэффициенты. Закон Пашена. Пробой в переменных электромагнитных полях (ВЧ и СВЧ разряды). Самостоятельные и несамостоятельные разряды. Тлеющий разряд. Дуговой разряд.	4
10	Пробой при высоком давлении газа. Стример. Пробой длинных промежутков. Стример в длинных промежутках, лидер, искровой канал. Линейная молния. Ступенчатый и стреловидный лидер, возвратный удар, гром. Шаровая молния. Прохождение электронного пучка через вакуум, плазму и газ.	4
11	Нелинейные явления и неустойчивости в плазме. Виды неустойчивостей плазмы. Неустойчивость плазменного шнура в магнитном поле (перетяжки и изгибы), стабилизация внешним магнитным полем. Ионизационно-перегревная неустойчивость газового разряда, контракция газового разряда, методы стабилизации. Роль нелинейных явлений в плазме. Взаимодействие плазменных колебаний с электронами плазмы. Парадокс Ленгмюра, затухание Ландау.	4
12	Пучковая неустойчивость. Буннемановская (двухпотоковая) неустойчивость. Уединенные волны. Солитоны и автоволны. Уравнение Кортевега-де-Вриза. Ленгмюровский солитон в плазме. Нелинейный ионный звук. Эффект Гана.	3
ВСЕГО (часов)		36

Практические занятия (семинары):

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	Идеальность плазмы, критерии неидеальности. Диаграмма состояний плазмы в различных условиях. Классификация плазмы: высоко- и низкотемпературная, изотермическая, разрядная и т.д.	4
2	Уравнение Саха. Расходимость статистических сумм атома, методы ограничения статистических сумм в плазме.	2
3	Возбуждение, метастабильные частицы. Диссоциация. Резонансная перезарядка.	4
4	Ионизационные процессы, реакция Пеннинга, ассоциативная ионизация; ступенчатая ионизация атома электронным ударом; фотоионизация.	4
5	Рекомбинация: парная рекомбинация; диссоциативная рекомбинация, тройная рекомбинация.	4

6	Кулоновские столкновения . Время максвеллизации и выравнивания энергии	4
7	Основные модели плазмы: кинетическая и гидродинамическая. Двухжидкостная гидродинамическая модель.	4
8	Плазма во внешнем электрическом поле. Электропроводность частично и полностью ионизированной плазмы.	4
9	Плазма как проводящая жидкость. "Вмороженность" магнитного поля в плазму. Прохождение поперечных электромагнитных волн через плазму, явление "отсечки".	4
10	Ионизационное размножение, лавина. Электрический пробой газов.	4
11	Пробой длинных промежутков. Прохождение электронного пучка через вакуум, плазму и газ.	4
12	Нелинейные явления и неустойчивости в плазме. Виды неустойчивостей плазмы. Взаимодействие плазменных колебаний с электронами плазмы.	4
13	Пучковая неустойчивость.	4
14	Солитоны и автоволны. Уравнение Кортевега-де-Вриза. Ленгмюровский солитон в плазме.	4
ВСЕГО (часов)		54

Лабораторные занятия: нет

Самостоятельная работа:

№ п.п.	Темы	Трудоёмкость (количество часов)
1	- изучение теоретического курса – выполняется самостоятельно каждым студентом по итогам каждой из лекций, результаты контролируются преподавателем на лекционных занятиях, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, методические пособия.	28
2	- решение задач по заданию преподавателя– решаются задачи, выданные преподавателем по итогам лекционных занятий и сдаются в конце семестра, используются конспект (электронный) лекций, учебники, рекомендуемые данной программой, а также сборники задач, включая электронные, учебно-методические пособия.	46
3	-подготовка к дифференцированному зачету	16
ВСЕГО (часов)		90

Содержание дисциплины

№ п/п	Название частей дисциплины	Разделы и темы лекционн ых занятий	Содержание	Объем	
				Аудит орная работа (часы)	Самос тояте льная работ а (часы)
1	I ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ПЛАЗМЕ. ЭЛЕМЕНТАР НЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЛАЗМЕ	Общие сведения о плазме	Введение. Понятие плазмы. Плазма в природе и лаборатории. Плазменная частота. Экранировка зарядов и дебаевская длина экранирования (Теория Дебая-Хюккеля). Идеальность плазмы, критерии неидеальности. Диаграмма состояний плазмы в различных условиях. Классификация плазмы: высоко- и низко-температурная, изотермическая, разрядная и т.д. Примеры плазмы. Генераторы плазмы.	6	5
2		Ионизаци онное равновес ие	Изотермическая (равновесная) плазма. Уравнение Саха. Расходимость статистических сумм атома, методы ограничения статистических сумм в плазме. Снижение потенциала ионизации.	4	5
3		Элемент арные процессы в плазме	Элементарные процессы в плазме. Понятие сечения. Упругие столкновения частиц, частота упругих соударений и транспортная частота. Неупругие столкновения. Возбуждение, метастабильные частицы. Диссоциация. Резонансная перезарядка. Ионизация электронным ударом. Ионизационные процессы при столкновении атомов и молекул в основном и возбужденном состояниях, реакция Пеннинга, ассоциативная ионизация. Ступенчатая ионизация атома электронным ударом. Фотоионизация.	10	5
4		Рекомбин ация в плазме	Парная рекомбинация положительного и отрицательного ионов. Прилипание электрона. Диссоциативная рекомбинация электрона и молекулярного иона. Тройная рекомбинация электронов и ионов. Тройная рекомбинация положительных и отрицательных ионов в газе. Кинетические уравнения образования и гибели. Уравнение	6	5

			диффузии.		
5		Процессы релаксации в плазме	Кулоновские столкновения. Кулоновский логарифм. Кулоновское сечение и частота потери направленного импульса. Время максвеллизации и выравнивания энергии в при электрон-электронных и электрон-ионных взаимодействиях.	7	6
6	II КИНЕТИЧЕСКОЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ В ПЛАЗМЕ. ПРОБОЙ В ГАЗАХ	Гидродинамическая модель плазмы	Два различных подхода при рассмотрении плазмы: плазма как система взаимодействующих частиц и плазма как сплошная проводящая среда. Основные модели плазмы: кинетическая и гидродинамическая. Двухжидкостная гидродинамическая модель. Примеры применения гидродинамической модели, вывод плазменных колебаний, поляризации плазмы, диэлектрической проницаемости.	6	5
7		Плазма во внешнем поле	Плазма во внешнем электрическом поле. Движение электронов и ионов в газе во внешних полях. Дрейф и подвижность электронов и ионов в постоянном электрическом поле. Электропроводность частично и полностью ионизованной плазмы. Средняя энергия электронов в газе, находящемся во внешнем поле. Неизотермическая плазма. Баланс энергий в плазме. Свободная и амбиполярная диффузия заряженных частиц.	8	6
8		Магнитогидродинамическая модель плазмы	Плазма как проводящая жидкость. "Вмороженность" магнитного поля в плазму. Дрейф в скрещенных полях. Диффузия магнитного поля в плазме. Волновые свойства плазмы. Альфвеновские волны и магнитный звук. Прохождение поперечных электромагнитных волн через плазму, явление "отсечки".	8	7
9		Различные механизмы пробоя в плазме. Пробой при низком давлении	Ионизационное размножение, лавина. Электрический пробой газов. Таунсендовский механизм пробоя, ионизационные коэффициенты. Закон Пашена. Пробой в переменных электромагнитных полях (ВЧ и СВЧ разряды). Самостоятельные и несамостоятельные разряды. Тлеющий разряд. Дуговой разряд.	8	11
10		Пробой при	Пробой при высоком давлении газа. Стример. Пробой длинных	8	11

		высоком давлении	промежутков. Стример в длинных промежутках, лидер, искровой канал. Линейная молния. Ступенчатый и стреловидный лидер, возвратный удар, гром. Шаровая молния. Прохождение электронного пучка через вакуум, плазму и газ.		
11	III НЕУСТОЙЧИ ВОСТИ В ПЛАЗМЕ	Неустойчи вости плазменно го шнура и газового разряда	Нелинейные явления и неустойчивости в плазме. Виды неустойчивостей плазмы. Неустойчивость плазменного шнура в магнитном поле (перетяжки и изгибы), стабилизация внешним магнитным полем. Ионизационно-перегревная неустойчивость газового разряда, контракция газового разряда, методы стабилизации. Роль нелинейных явлений в плазме. Взаимодействие плазменных колебаний с электронами плазмы. Парадокс Ленгмюра, затухание Ландау.	8	11
12		Пучковая неустойч ивость и нелинейн ые эффекты	Пучковая неустойчивость. Буннемановская (двухпотоковая) неустойчивость. Уединенные волны. Солитоны и автоволны. Уравнение Кортевега-де-Вриза. Ленгмюровский солитон в плазме. Нелинейный ионный звук. Эффект Гана.	11	11
ВСЕГО (часов)				90	90

Образовательные технологии

№ п/п	Вид занятия	Форма проведения занятий	Цель
1	лекция	изложение теоретического материала	получение теоретических знаний по дисциплине
2	лекция	изложение теоретического материала с помощью презентаций	повышение степени понимания материала
3	самостоятельная работа студента	подготовка к экзамену и зачету с оценкой	повышение степени понимания материала

8. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета.

1. Плазма в природе и лаборатории.
2. Плазменная частота.
3. Экранировка зарядов и дебаевская длина экранирования.
4. Уравнение Саха.
5. Расходимость статистических сумм, методы ограничения статистических сумм в уравнении Саха.
6. Упругие столкновения частиц. Сечение и частота упругих соударений и передачи импульса.
7. Кулоновские столкновения.
8. Основные элементарные процессы в плазме: ионизация электронным ударом, рекомбинация, диффузия.
9. Образование и рекомбинация заряженных частиц в плазме.
10. Двухжидкостная гидродинамическая модель плазмы. Примеры.
11. Дрейф и подвижность электронов и ионов в постоянном электрическом поле.
12. Электропроводность частично ионизованной плазмы.
13. Электропроводность полностью ионизованной плазмы.
14. Средняя энергия электронов в газе, находящемся во внешнем поле.
15. Неизотермическая плазма. Баланс энергий в плазме.
16. Амбиполярная диффузия заряженных частиц.
17. Вмороженность магнитного поля в плазму.
18. Диффузия магнитного поля в плазме.
19. Прохождение электронного пучка через газ и плазму.
20. Ионизационное размножение, лавина. Пробой газов низкого давления.
21. Таунсендовский механизм пробоя, ионизационные коэффициенты.
22. Закон Пашена для пробоя газов.
23. Пробой газов при высоком давлении. Самоторможение лавин. Стример.
24. Стример в длинных промежутках, стримерная корона, лидер, искровой канал.
25. Молния. Шаровая молния и ее модели.
26. Пробой в высокочастотном поле. Оптический пробой.
27. Тлеющий разряд. Структура тлеющего разряда, катодный слой, положительный столб. Теория Шоттки.
28. Изотермическая (равновесная) плазма. Электрическая дуга.
29. Альфвеновские волны.
30. Ионный звук.
31. Прохождение поперечных электромагнитных волн через плазму, “отсечка”.
32. Виды неустойчивостей плазмы.
33. Ионизационно-перегревная неустойчивость. Контракция газового разряда.
34. Взаимодействие плазменных колебаний с электронами плазмы. Парадокс Ленгмюра. Затухание Ландау.
35. Пучковая неустойчивость.
36. Буннемановская неустойчивость.
37. Солитоны. Уравнение Кортевега-де Вриза.
38. Ленгмюровский солитон в плазме.

Ответы на контрольные вопросы.

1.

1.7 Типы низкотемпературной плазмы

В литературе принято разделять типы НТП по способам ее получения, ее параметрам и использованию.

1. Газоразрядная плазма - плазма газового разряда. Используется часто как синоним положительного столба разряда.
2. Приэлектродная плазма - плазма в приэлектродных частях дугового разряда, включая плазму катодных пятен.
3. Лазерная плазма - плазма, образующаяся при облучении среды лазерным излучением. Сюда же входит приповерхностная лазерная плазма, возникающая при облучении твердого тела, и лазерный "плюм" - плазма, образующаяся при лазерном распылении твердого образца вблизи его поверхности.
4. Фоторезонансная плазма - плазма, образующаяся при облучении пара (газа) светом с длиной волны меньшей, чем потенциал ионизации и мощностью, недостаточной для начала многофотонных процессов.
5. Пучковая плазма, образующаяся при взаимодействии с атомами газовой мишени электронного пучка.
6. Плазма с конденсированной дисперсной фазой, содержащая твердые или жидкие макрочастицы. Одной из ее разновидностей является пылевая плазма.
7. Астрофизическая плазма в атмосферах астрофизических объектов (например, облака ионизованного натрия вблизи спутника планеты Юпитера - Ио).
8. Плазма металлов, проводниковая плазма - электроны, удерживаемые полем положительных ионов в твердом теле.

2. Осн. [2] §7.7.1

3. Осн. [2], раздел 2.9

4. Осн. [2], раздел 14.10.1. Осн. [1], ГЛАВА 3. Осн. [4], раздел

5. Осн. [2], раздел Осн. [4], раздел 2.

6. Осн. [2], разделы 2.1-2.6

7. Осн. [2], раздел. 2.8

8. Осн. [2], разделы 3.1, 5.2, 5.10, 5.11.

9. Осн. [2], разделы 5.3-5.9, глава 6.

10.

1.4 Гидродинамическая модель двух жидкостей

В рамках гидродинамической модели плазма представляет собой смесь электронной и ионной жидкостей (предельный случай неидеальной пол-

ностью ионизованной плазмы). Модель применима для плазмы с линейными размерами L , намного превышающими длину свободного пробега заряженных частиц, и временем между столкновениями много меньше длительности самих процессов. Полная информация о локальных характеристиках компонент плазмы полностью исчерпывается совокупностью трех величин: концентрации N , температуры T и средней скорости частиц $\vec{v}$. Несмотря на то, что гидродинамическая модель далеко не всегда применима к условиям НТП (см. ниже) приведем основные положения приближенной модели плазмы как "сплошной среды" или "двухкомпонентной проводящей жидкости". Полная информация о локальных характеристиках плазменных компонент (i) и электронов (e) определяется величинами концентрации (плотности) заряженных частиц (N_i) и (N_e), их температурой T_i и T_e и средней скоростью $\vec{v}_i$ и $\vec{v}_e$. Система уравнений гидродинамического приближения плазмы как смеси ионной и электронной жидкостей в линейном приближении в отсутствии магнитного поля включает в себя уравнения непрерывности (1.20), (1.21) и уравнения, описывающие движения единичных объемов жидкости разного знака (аналог второго закона Ньютона (1.22) и (1.23).

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \text{div}(N_i \vec{v}_i) = 0, \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \text{div}(N_e \vec{v}_e) = 0, \quad (1.21)$$

$$N_i M_i \frac{\partial \vec{v}_i}{\partial t} = -\text{grad}(N_i T_i) + N_i e Z \vec{E} + \vec{F}_{ie}, \quad (1.22)$$

$$N_e M_e \frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} = -\text{grad}(N_e T_e) - N_e e \vec{E} + \vec{F}_{ei}. \quad (1.23)$$

Здесь M_i и m_e - соответственно масса иона и электрона, Z - заряд иона, при $Z = 1$ в квазинейтральной плазме $N_t = N_i = N$. Первые слагаемые в (1.22) и (1.23) описывают движение частиц под действием градиента давления компонент "жидкости", вторые - движение частиц под действием электрического поля напряженностью $\vec{E}$ в плазме, третьи - силу взаимного трения, равную импульсу, передаваемому в единицу объема за одну секунду от частиц одной компоненты плазмы частицам другой компоненты.

$$F_{ie} = -F_{ei} \quad (1.24)$$

Уравнения непрерывности (1.20,1.21) говорят о сохранении числа частиц каждого сорта, соотношения (1.22,1.23) - аналог второго закона Ньютона при действии на частицу градиента давления, электрического взаимодействия и сил взаимного трения при бинарных столкновениях. Как объект исследований плазма в ряде случаев может рассматриваться как бесстолкновительная среда. Такие макроскопические характеристики НТП как явления переноса, закон Ома и др. хорошо описываются в гидродинамической модели на характерных геометрических размерах много меньших длины свободного пробега частиц. Сюда же относятся процессы плазменных колебаний, распространение электромагнитных волн. В условиях НТП плазменные колебания могут перейти в режим распространяющихся волн при наличии теплового давления нейтрального газа под воздействием электростатических сил (плазменные колебания) и силы давления нейтрального газа (акустические волны). Отсюда и двойное название таких колебаний - плазменные или электрозвуковые. Заметим, что упрощенные методы расчета плазменных характеристик в рамках гидродинамической модели предполагают выполнение условия $T_e = T_i$, и не принимается во внимание магнитное поле, индуцированное движением заряженных частиц. В случае идеальной плазмы система становится трехкомпонентной - добавляется жидкость нейтральных атомов. Заряженные плазменные компоненты имеют два канала взаимодействия - столкновительный и посредством генерируемых ими электромагнитных полей ($\vec{E}$ и $\vec{B}$). Гидродинамические уравнения движения частиц отличается от уравнения Навье-Стокса для обычной проводящей жидкости тем, что в нем учитываются электромагнитные силы и столкновения частиц разного сорта. В τ -приближении для характеристики процесса столкновений с нейтралями введенное понятие силы трения выражаются как

$$\vec{F} = -\frac{nM(\vec{v} - \vec{v}_0)}{\tau}, \quad (1.25)$$

Здесь τ - среднее время взаимодействия с нейтралями, $\vec{v}$ и $\vec{v}_0$ - скорости заряженной и нейтральной компонент соответственно, n и M - плотность и масса нейтральных частиц. Заметим также, что гидродинамическая модель предполагает максвелловский характер распределения частиц по скорости, хотя и не слишком критична к отступлению от него. Также как и в кинетической теории (уравнение Власова) в модели двух жидкостей возможен бесстолкновительный вариант, когда помимо понятия частоты столкновений возникает еще один характерный масштаб - частота колебаний. В системе уравнений бесстолкновительной гидродинамики сила трения не учитывается. В заключение подчеркнем, что раздел между кинетическим и гидродинамическим описаниями плазмы основан не на применимости их строго к плазмам разного типа, а на различии базовых процессов взятых за основу.

Осн. [2], раздел 4.8

11. Осн. [2], раздел 4.1, 4.5

12. Осн. [2], раздел 4.2.1.

13. Осн. [2], раздел 4.2.2.

14. Осн. [2], раздел 4.3

15. Осн. [2], раздел 4.3, 14.11, 15.1.

16. Осн.[2], раздел 4.6

17. Доп. [6], § 26

18. Доп. [6], § 26.

19. . Осн. [2], раздел 7.7.3

20. Осн. [2], разделы 16.2, 11.1, 11.2.1.
21. . Осн. [2], раздел 11.2.2.
22. . Осн. [2], раздел 11.2.4.
23. . Осн. [2], разделы 16.2, 16.3
24. . Осн. [2], разделы 16.5-16.8
25. . Осн. [2], раздел 16.11
26. Осн. [2], разделы 11.3 и 11.6
27. Осн. [2], разделы 12.2-12.6
28. . Осн. [2], разделы 14.2-14.6
- 29-30.

В плазме существует широкий класс различных типов колебаний. Энергия этих колебаний может стать достаточно велика, чтобы влиять на параметры плазмы. Ниже мы остановимся на некоторых наиболее распространенных в условиях НТП в отсутствие магнитного поля типов колебаний: акустических колебаний газа, высокочастотных колебаний плазмы, неустойчивостей пучок - плазма. В условиях идеальной НТП взаимодействие электронов и плазменных колебаний не влияет на ФР-ЭЭ при условии:

$$\frac{N'_e}{N_e} \ll \frac{N_e e^6}{T_e^3} \ll 1. \quad (2.1)$$

Здесь N'_e - амплитуда колебаний концентрации электронов в поле электромагнитной волны.

Под понятием собственных колебаний плазмы будем понимать процесс распространения возмущений в плазменной среде с конечной величиной скорости, сопровождающийся переносом энергии. При этом можно выделить два типа колебаний(волн). Колебания 1-го типа, для которых волновой вектор $\vec{k}$ перпендикулярен направлению распространения z , связаны с переносом электромагнитной энергии и непосредственно не приводят к изменениям плотности и энергии плазменных частиц. Колебания и волны второго типа $\vec{k} || z$ приводят к эффектам "сжатия" плотности заряженных частиц, инициированным полем объемного заряда на длинах порядка Дебаевского радиуса. Это соответствует в условиях НТП электростатическим плазменным колебаниям с ленгмювской частотой (1.33). Если интенсивность волны велика, то под ее воздействием может реализоваться режим ударных волн. При этом отдельные участки (фазы) волны начинают распространяться с разной скоростью: фаза "сжатия" движется с большей скоростью чем фаза "раз-

ряжения". В итоге приход волны воспринимается как "удар". В самом простом случае для плоской монохроматической волны

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp[i(\vec{k} \vec{r} - \omega t)]. \quad (2.2)$$

Здесь величине $\vec{E}$ соответствует действительная часть комплексного выражения записанного справа, ω - частота волны, $\vec{r}$ - радиус вектор, $\vec{k}$ - волновой вектор, по модулю равный

$$k = \frac{\omega}{v_{ph}} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.3)$$

где v_{ph} и λ - фазовая скорость и длина волны. Волны более сложных типов могут быть разложены преобразованием Фурье на плоские монохроматические волны. В случае, если фазовые скорости всех компонент одинаковы, скорость распространения волны и ее Фурье компонент одинаковы (дисперсия отсутствует). Если же наблюдается зависимость скорости Фурье компонент от частоты форма волны при ее распространении будет меняться. В этом случае под скоростью волны подразумевают так называемую групповую скорость. Эта скорость определяется из условия постоянства разности фаз между соседними Фурье компонентами при распространении волны. Под понятием "резонанс" понимается ситуация, когда при быстром увеличении v_{ph} уменьшается настолько, что может сравниться со скоростью частицы, что приводит к "резонансному" взаимодействию поля и частицы. Условие "резонанса" в условиях низкотемпературной плазмы прежде всего реализуется для высокоэнергичных электронов максвелловской функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). При малых значениях показателя преломления n фазовая скорость возрастает, а групповая падает. Уменьшение v_{gr} накладывает запрет на дальнейшее распространение волны.

В условиях НТП колебания и шумы плазмы играют существенную роль. Дальнодействующий характер кулоновского взаимодействия заряженных частиц в плазме вызывает колебания ее параметров. Наиболее простой тип колебаний в газовой среде - акустические колебания или возникновение волн сжатия и разрежения, распространяющихся в газе. Частота акустических колебаний ω_a связана с температурой и массой частиц газа дисперсионным соотношением:

$$\omega_a = k\sqrt{\gamma\frac{T}{M}}, \quad \gamma = \frac{p}{v}, \quad (2.4)$$

где γ - отношение теплоемкости среды при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме. Скорость распространения звука в газе (групповая скорость) порядка тепловой скорости частиц. В плазме при отсутствии внешнего поля осуществляются два типа плазменных колебаний. Из-за большого различия в массе электронов и ионов, связанные с ними плазменные осцилляции существенно отличаются. Колебания, обусловленные движением электронов, это плазменные или Ленгмюровские колебания, микромасштаб которых (поляризационная длина) порядка дебаевского радиуса. Как и для случая акустических колебаний для плазменных колебаний дисперсионное соотношение имеет вид:

$$\omega^2 = \omega_0^2 + \gamma v_z^2 k^2, \quad (2.5)$$

где ω_0 - электронная плазменная частота, v_z - компонента скорости электрона в направлении волнового вектора. С движением ионов в изотропной однородной плазме связывают понятие ионного звука. Так же как и плазменные колебания, ионный звук представляет собой продольную волну. Ионный звук может распространяться в плазме только при условии $T_e \gg T_i$.

Все приведенные выше выводы относились к случаям ионизованного газа и идеальной плазмы. Для плазмы с высокой проводимостью (переход к плазме неидеальной) в магнитном поле присущи, так называемые, магнитогидродинамические волны. В последнем случае силовые линии магнитного поля по оси z (рассматриваем цилиндрическую плазменную конфигурацию) считаются замороженными в плазму и существуют два типа осцилляции. Первый тип осцилляции вдоль оси z ($\vec{k} \parallel \vec{z}$) с частотой

$$\omega_1 = \frac{H_0 k}{\sqrt{4\pi N}}, \quad (2.6)$$

где H_0 - напряженность магнитного поля в плоскости xy , N - концентрации заряженных частиц. Второй тип: осцилляции в плоскости xy . Фазовая скорость магнитогидродинамических волн совпадает с групповой скоростью и носит название Альфеновской скорости. При распространении электромагнитных волн в плазме поле волны индуцирует магнитное

поле, которое в свою очередь воздействует на параметры электромагнитной волны. Волны с характерной частотой меньшей плазменной частоты затухают и характерная длина затухания порядка $c/\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}$.

Корректный учет влияния на колебания и волны в плазме нейтральной плазменной компоненты приводит к затуханию плазменных осцилляций и дисперсионному соотношению:

$$\omega = [(\omega_0^2 + \gamma v_x^2)k^2]^{1/2} - \frac{1}{\tau}, \quad (2.7)$$

в предположении, что $\omega\tau \gg 1$, где τ - характерное время упругих столкновений. Здесь γ - фактор затухания плазменных колебаний (затухание Ландау) определяется взаимодействием волны и заряженных частиц и связан с особенностями функции распределения электронов по скоростям в присутствии электромагнитного поля. При значениях сечений упругих столкновений порядка газокINETических ($\sigma \approx 10^{-15} \text{ см}^2$), энергии электронов порядка 1 эВ и частоте ω порядка плазменной получаем условие существования плазменных волн:

$$N_e^{1/2}/N \gg 10^{-12} \text{ см}^{3/2}. \quad (2.8)$$

Таким образом, столкновения не единственный процесс затухания электромагнитных волн в плазме (плазменных колебаний). Заметим, что резонансные процессы ускорения заряженных частиц при их взаимодействии с плазменными колебаниями, начиная с 60-х годов, рассматриваются как проявление механизма стохастического ускорения.

31. Осн. [2], разделы 7.5-7.6
32. Осн. [1], раздел 2.1, Осн. [2], глава 13.
33. Осн. [2], раздел 13.4, 13.8.
34. Осн. [2], раздел 7.7.3.
- 35-36.

Известно несколько типов неустойчивости системы пучок-плазма при концентрации электронов пучка N_b , много меньшей, а тепловой скорости v_b много большей соответствующих параметров N_t и v_t плазмы - мишени. В рамках неустойчивости типа "пучок - плазма" полагается, что колебания плазмы, увеличивая свою энергию за счет энергии электронов пучка, усиливаются. Важно иметь при этом в виду, что функция распределения электронов по энергиям в поле электромагнитной волны не изменится, если τ_{ee} много меньше, чем период колебаний электрона в поле волны. В рамках модели известно дисперсионное соотношение:

$$1 = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} + \frac{\omega_0^2}{(\omega - kv_b)^2} \frac{N_b}{N_t}, \quad (2.16)$$

где ω_0 - плазменная частота, k - волновое число, v_b - скорость b электронов. Если фазовая скорость плазменных колебаний $\omega/k \approx v_b$, взаимодействие пучок - плазма будет иметь резонансный характер. Осцилляции такого рода слабо влияют на параметры плазмы.

Второй тип неустойчивости основан на модели взаимодействия b и t электронов, при которой энергия пучка трансформируется в энергию плазменных колебаний непосредственно через взаимодействие с электронами плазмы. Известна также, так называемая, неустойчивость Бунемана, которая может развиваться в системе плазма - пучок, если средняя скорость электронов в плазме отличается от скорости ионов, т.е. для типичных случаев неравновесной НТП.

2.3.3 Солитоны

Развитие исследований в этой области, начатое в семидесятые годы прошлого века, привело к пониманию роли солитонов в плазме и их взаимодействия с волнами и частицами в плазме. Солитонами называются локализованные волновые пакеты реализующиеся в низкотемпературной плазме и сохраняющие свою индивидуальность при взаимных столкновениях. При этом может просматривается некая аналогия с дуализмом волна - частица. Солитоны могут наблюдаться в условиях плазменных колебаний разного типа: Ленгмюровских, ионно - звуковых и др. Интересно отметить что моделирование спектральной структуры галактики с успехом использует понятие так называемых "дрейфовых солитонов".

Сегодня в теории существует понятие "элементарные процессы" взаимодействия солитонов с частицами и волнами в плазме. Одной из нерешенных задач физики солитонов является исследование их влияния на процессы плазменной кинетики таких, как формирование функции распределения частиц по скоростям, взаимодействие электронный пучок - плазма, исследование влияния солитонов на процессы переноса прежде всего в замагниченной плазме и даже исследование влияния солитонов на процессы в магнитосфере Земли и др.

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор), доступ к сети Интернет

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Основная литература

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Интеллект, 2009. ISBN: 978-5-91559-019-8 (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/book/288386/?q=%D0%A0%D0%B0%D0%B9%D0%B7%D0%B5%D1%80+>).
2. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы, Москва, ИД "Интеллект", 2008. (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/book/250857/?q=%D0%A4%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BA-%D0%9A%D0%B0%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%86%D0%BA%D0%B8%D0%B9+>).
3. Фортов В.Е., Филинов В.С., Ларкин А.С., Эбелинг В. Статистическая физика плотных газов и неидеальной плазмы. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2020.
4. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы. Том 1. Основы физики плазмы. Санкт-Петербург : Издательство "Лань", 2023 г. 400 с. ISBN 978-5-507-46437-1
5. Котельников И. А. Лекции по физике плазмы. Том 2. Магнитная гидродинамика. Санкт-Петербург: Издательство "Лань", 2025 г. 448 с. ISBN 978-5-507-50489-3
6. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. Санкт-Петербург: Издательство "Лань", 2012 г. 512 с. ISBN 978-5-8114-1037-8
7. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. 2011 г. 448 с. ISBN 978-5-8114-1198-6
8. Кузелев М.В. Введение в физику плазмы. Издательство "Ленанд", 2022 г. ISBN 978-5-9710-9495-1
9. Чирков А. Ю. Введение в физику плазмы. Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана 2006 г. 50 с. ISBN 5-7038-2827-9
10. Введение в физику низкотемпературной плазмы / А. Н. Ключарев, В. Г. Мишаков, Н. А. Тимофеев ; Санкт-Петербургский гос. ун-т. - Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского

ун-та, 2009. 221 с. ISBN 978-5-288-04874-6

11. Жданов С. К., Курнаев В. А., Романовский М. К., Цветков И. В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. -М: МИФИ, 2000.

12. Двинин С.А. Физические основы газового разряда. Часть 1. Учебное пособие. Москва. МГУ имени М.В. Ломоносова. Физический факультет, 2012, 119 с. Избранные вопросы физики плазмы и её применения. Вып. 1: Учебное пособие Под редакцией В.А. Курнаева. М.: НИЯУ МИФИ, 2017.

http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/Lecture_reports/2017%20%D0%98%D0%B7%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%B2%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%8B%20%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B8%20%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%BC%D1%8B%20%D0%B8%20%D0%B5%D1%91%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F.pdf

Дополнительная литература

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, под ред. В.Е. Фортова, Москва, Наука (2000 - 2008). (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/search/?q=1.%09%D0%AD%D0%BD%D1%8B%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D1%8F+%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B9+%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%BC%D1%8B&x=6&y=6>)
2. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М: Наука, 1982. (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/book/251702/?q=%D0%91%D0%B8%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D0%BD+>)
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/book/8744/?q=%D0%91%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D0%BB%D1%8F%D0%BD+>)
4. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2004. (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/book/37492/?q=%D0%A4%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0+%D0%BD%D0%B5%D0%B8%D0%B4%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B9+%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%BC%D1%8B>)
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том VIII. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит, 2005. (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/book/251294/?q=%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BC%D0%B8%D0%BA%D0%B0+%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D1%88%D0%BD%D1%8B%D1%85+%D1%81%D1%80%D0%B5%D0%B4>)
6. Жданов С. К., Курнаев В. А., Романовский М. К., Цветков И. В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. - М: МИФИ, 2000. (Электронная библиотека МФТИ: <http://lib.mipt.ru/book/380/?q=%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B+%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85+%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%B2+%D0%B2+%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%BC%D0%B5+%D0%B8+%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85+%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B0%D1%85>)
7. Курнаев В.А., Протасов Ю.С., Цветков И.В. Введение в пучковую электронику: Учебное пособие / Под ред. В.А. Курнаева. – М.: МИФИ, 2008.

[http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/Lecture_reports/\[Kurnaev_V.A.,_Protasov_YU.S.,_Cvetkov_I.V.,_Pod_r\(%D0%92%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%B2%20%D0%BF%D1%83%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%83%D1%8E%20%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D1%83\).pdf](http://plasma.mephi.ru/ru/uploads/files/Lecture_reports/[Kurnaev_V.A.,_Protasov_YU.S.,_Cvetkov_I.V.,_Pod_r(%D0%92%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%B2%20%D0%BF%D1%83%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%83%D1%8E%20%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D1%83).pdf)

8. Рожанский В. А. Теория плазмы. СПб. Лань, 2012. 320 с. ISBN: 978- 5-8114-1233-4
9. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. Изд. 2, сущ. доп. URSS. 2018. 440 с. ISBN 978-5-9710-4505-2.

Электронные ресурсы, включая доступ к базам данных и т.д.

1. Курс лекций «Физика плазмы», <http://www.inp.nsk.su/chairs/plasma/sk/fpl.ru.shtml>

Программу составил



Василяк Л.М., д.ф.-м.н., профессор

«9» июня 2025 г.