

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

**М. О. Азарєнков**  
**І. Б. Денисенко**  
**М. І. Гришанов**

# **КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ ХВИЛЬ В ОДНОРІДНІЙ ПЛАЗМІ БЕЗ ЗІТКНЕНЬ**

Навчальний посібник

Харків – 2018

**Рецензенти:**

**В. І. Засенко** – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи (Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, м. Київ);

**В. М. Куклін** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри штучного інтелекту та програмного забезпечення (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна);

**В. І. Ткаченко** – доктор фізико-математичних наук, професор, директор Науково-виробничого комплексу «Відновлювані джерела енергії та ресурсозберігаючі технології» (ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України).

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради  
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна  
(протокол № 18 від 22.12.2017 р.)*

**Азарєнков М. О.**

А 35 Кінетична теорія хвиль в однорідній плазмі без зіткнень : навчальний посібник [для студентів та аспірантів, які вивчають фізику плазми] / М. О. Азарєнков, І. Б. Денисенко, М. І. Гришанов. – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2018. – 176 с.

ISBN 978-966-285-494-7

Навчальний посібник написано на основі лекцій, які читалися авторами протягом багатьох років у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна студентам 4 курсу фізико-технічного факультету, що вивчають курс «Основи фізики плазми». Особлива увага приділена кінетичній теорії хвиль малої амплітуди у плазмі за відсутності зіткнень (між частинками), що вільна від зовнішніх полів, та в анізотропній магнітоактивній плазмі. Зміст посібника відповідає програмі з фізики плазми для студентів класичних університетів, що навчаються за напрямком «Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми».

**УДК 533.951(075.8)**

ISBN 978-966-285-494-7

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2018

© Азарєнков М. О., Денисенко І. Б., Гришанов М. І., 2018

© Риждова Ю. М., макет обкладинки, 2018

## ЗМІСТ

Передмова.....	5
1. Вступ до фізики плазми. Основні поняття та характеристики.....	6
Контрольні питання до розділу 1.....	16
2. Вступ до кінетичної теорії плазми.....	17
2.1. Методи опису різних процесів у плазмі.....	17
2.2. Основні рівняння електродинаміки плазми.....	19
2.3. Матеріальні рівняння.....	20
2.4. Моменти функції розподілу.....	22
2.5. Кінетичні рівняння.....	23
2.6. Самоузгоджене поле.....	25
2.7. Замкнені системи самоузгоджених рівнянь.....	26
2.8. Метод малих збурень.....	27
2.9. Електропровідність плазми з постійним струмом.....	28
2.10. Стаціонарні функції розподілу в однорідній плазмі.....	30
Контрольні питання до розділу 2.....	34
3. Дисперсійні рівняння для плоских хвиль малої амплітуди.....	36
3.1. Плоскі та циліндричні хвилі.....	36
3.2. Дисперсійне рівняння для плоских електромагнітних хвиль.....	38
3.3. Виведення дисперсійного рівняння для плоских хвиль.....	40
3.4. Початкова та гранична задачі розв'язання дисперсійних рівнянь.....	42
3.5. Дисперсійні характеристики хвиль.....	43
3.6. Основні властивості тензора діелектричної проникності.....	45
3.7. Потужність, що поглинається в плазмі.....	46
3.8. Дисперсійні характеристики слабозгасаючих хвиль.....	48
Контрольні питання до розділу 3.....	49
4. Тензор діелектричної проникності однорідної необмеженої ізотропної плазми без зіткнень.....	51
4.1. Вихідні рівняння Максвелла–Власова.....	51
4.2. Розв'язок лінеаризованого рівняння Власова.....	52
4.3. Тензори ВЧ провідності та діелектричної проникності.....	53
4.4. Дисперсійні рівняння.....	56
4.5. Потенціальність поздовжніх хвиль.....	58
4.6. Базовий сингулярний інтеграл та правило Ландау.....	61
Контрольні питання до розділу 4.....	63
5. Коливання та хвилі в рівноважній однорідній ізотропній плазмі без зіткнень.....	64
5.1. Дисперсійне рівняння поздовжніх хвиль в рівноважній плазмі.....	64
5.2. Високочастотні поздовжні хвилі.....	69
5.3. Фізичний сенс загасання Ландау.....	73
5.4. Низькочастотні поздовжні хвилі.....	77
5.5. Електростатичне екранування низькочастотних поздовжніх хвиль.....	81
5.6. Поперечні хвилі в ізотропній плазмі.....	81
5.7. Нормальний та аномальний скін-ефекти.....	85
Контрольні питання до розділу 5.....	87

6. Нестійкості поздовжніх хвиль в однорідній плазмі .....	89
6.1. Стійкість та нестійкість плазми .....	89
6.2. Пучково-плазмова нестійкість .....	91
6.2.1. Пучок з великим тепловим розкидом .....	93
6.2.2. Монохроматичний пучок електронів. Гідродинамічна нестійкість .....	94
6.2.3. Урахування теплових поправок. Кінетична нестійкість .....	99
6.3. Нестійкість іонно-звукових хвиль у плазмі зі струмом .....	100
Контрольні питання до розділу 6 .....	103
7. Тензор діелектричної проникності плазми без зіткнень в однорідному магнітному полі .....	105
7.1. Вихідні рівняння .....	105
7.2. Лінеаризація рівнянь Максвелла–Власова .....	108
7.3. Розв’язок лінеаризованого рівняння Власова .....	110
7.4. Тензори ВЧ провідності та діелектричної проникності .....	115
7.5. Умови фазового резонансу хвиля-частинка в замагніченій плазмі .....	118
7.6. Діелектричний тензор в рівноважній замагніченій плазмі без зіткнень .....	120
Контрольні питання до розділу 7 .....	123
8. Хвилі в рівноважній замагніченій плазмі без зіткнень .....	125
8.1. Хвильове та дисперсійне рівняння .....	125
8.2. Функція діелектричного відгуку .....	127
8.3. Хвилі в холодній плазмі без зіткнень .....	129
8.3.1. Хвилі, що поширюються вздовж $\mathbf{H}_0$ .....	131
8.3.2. Хвилі, що поширюються поперек $\mathbf{H}_0$ .....	138
8.3.3. «Косе» поширення низькочастотних МГД хвиль .....	141
8.4. МГД хвилі у плазмі з гарячими електронами .....	143
8.4.1. Тензор $\varepsilon_{ij}$ для низькочастотних хвиль в замагніченій плазмі .....	143
8.4.2. Кінетична альфвенівська хвиля .....	145
8.4.3. Дисперсійні характеристики А та ШМЗ хвиль .....	146
8.5. Кінетична теорія циклотронних хвиль у плазмі без зіткнень .....	148
8.6. Хвилі (моди) Бернштейна .....	152
Контрольні питання до розділу 8 .....	155
9. Нестійкість циклотронних хвиль у плазмі із анізотропною температурою .....	157
9.1. Плазма з анізотропною температурою .....	157
9.2. Поперечна діелектрична сприйнятливість замагніченої плазми .....	159
9.3. Дисперсійні характеристики циклотронних хвиль .....	160
Контрольні питання до розділу 9 .....	164
Висновки .....	166
Література .....	167
Предметний покажчик .....	169