

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В. Н. КАРАЗНА

О. Ф. Целуйко  
Я. О. Гречко

**ФІЗИКА ІНТЕНСИВНИХ ПУЧКІВ  
ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК**

Навчальний посібник

*За загальною редакцією І. О. Гірки*

Харків – 2022

УДК 537 (07)

Ц 34

**Рецензенти:**

**А. М. Веклич** – доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри фізичної електроніки факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**В. І. Маслов** – доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Інституту плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

*Затверджено до друку рішенням Вченої ради  
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна  
(протокол № 9 від 30 серпня 2021 року)*

**Целуйко О. Ф.**

Ц 34

Фізика інтенсивних пучків заряджених частинок : навчальний посібник / О. Ф. Целуйко, Я. О. Гречко ; за заг. ред. І. О. Гірки. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2022. – 180 с.

ISBN 978-966-285-726-9

Посібник створено на основі конспекту лекцій доцента фізико-технічного факультету О. Ф. Целуйка, який багато років яскраво та талановито вів курси з динаміки пучків заряджених частинок та фізичних основ пучково-плазмових технологій: читав лекції та проводив лабораторні роботи. Питання, що висвітлено в посібнику, повністю відповідають програмі навчального курсу «Динаміка пучків заряджених частинок». Матеріал викладено детально та послідовно, без скорочень, з ретельним роз'ясненням положень, які зазвичай викликають у студентів труднощі з розумінням. Посібник призначено для збагачення методичного забезпечення організації самостійної роботи студентів, містить значну кількість авторських рисунків, що сприяють розумінню геометрії досліджуваних задач та фізики процесів; полегшить вивчення фізичних технологій із застосуванням пучків заряджених частинок, зокрема виконання відповідних лабораторних робіт. Разом із тим, посібник стане в нагоді фахівцям, які починають самостійно опановувати пучково-плазмові технології.

**УДК 537 (07)**

ISBN 978-966-285-726-9

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2022

© Целуйко О. Ф., Гречко Я. О., 2022

© Чорна О. Д., макет обкладинки, 2022

## ЗМІСТ

Умовні позначення.....	6
Вступ.....	7
<b>1. АПЕРІОДИЧНІ НЕСТІЙКОСТІ ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК.....</b>	<b>10</b>
1.1. Аперіодичні нестійкості пучків заряджених частинок без зарядової компенсації.....	11
1.1.1. Нестійкість і граничний струм некомпенсованого пучка заряджених частинок у циліндричному пучкопроводі. Струм Бурсіана.....	11
1.1.2. Механізм замикання надкритичного пучка заряджених частинок. Віртуальний катод.....	25
1.2. Аперіодичні нестійкості компенсованих пучків заряджених частинок.....	38
1.2.1. Нестійкість і граничний струм квазінейтрального електронного пучка. Задача Пірса.....	39
1.2.2. Нестійкість і граничний струм квазінейтрального йонного пучка.....	43
1.3. Аперіодичні нестійкості релятивістських пучків заряджених частинок.....	49
1.3.1. Нестійкість і граничний струм релятивістського електронного пучка.....	51
1.3.2. Замикання сильнострумового електронного пучка власним магнітним полем. Струм Альфвена.....	54
Питання для самоконтролю.....	57
<b>2. МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНІ НЕСТІЙКОСТІ ПУЧКІВ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК.....</b>	<b>59</b>
2.1. Метод дисперсійного рівняння для просторово-однорідних систем пучок-плазма.....	61
2.1.1. Дисперсійне рівняння для холодної пучково-плазмової системи.....	62
2.1.2. Дисперсійне рівняння для холодної пучково-плазмової системи в магнітному полі.....	71

2.1.3. Дисперсійне рівняння в магнітному полі з урахуванням теплового руху.....	81
2.1.4. Дисперсійне рівняння з урахуванням теплового руху та зіткнень у магнітному полі.....	90
2.2. Власні коливання частинок пучка та плазми.....	94
2.2.1. Власні коливання частинок плазми.....	94
2.2.1.1. Електронні коливання плазми без магнітного поля.....	95
2.2.1.2. Йонні та йонно-звукові хвилі в плазмі.....	96
2.2.2. Власні коливання частинок пучка.....	97
2.2.2.1. Власні коливання електронного пучка.....	97
2.2.2.2. Власні коливання йонного пучка.....	98
2.3. Загальні властивості пучкових нестійкостей.....	100
2.3.1. Позитивний зворотний зв'язок у системі пучок-плазма.....	100
2.3.2. Поріг пучкової МГД-нестійкості.....	101
2.3.3. Критичний струм пучка.....	103
2.4. Електрон-електронні нестійкості.....	104
2.4.1. Двопучкова нестійкість.....	105
2.4.2. Нестійкість електронного пучка в плазмі.....	107
2.4.2.1. Збудження ленгмюрових коливань.....	109
2.4.2.2. Рівень розгойдування МГД-коливань.....	110
2.4.3. Пучково-плазмова система як підсилювач сигналу.....	112
2.5. Електрон-іонні нестійкості.....	116
2.5.1. Збудження йонних і йонно-звукових коливань електронними пучками.....	116
2.5.2. Нестійкість відносного руху електронів і йонів. Нестійкість Бунемана.....	120
2.6. Іон-електронні нестійкості.....	127
2.6.1. Випадок повільного йонного пучка.....	128
2.6.2. Випадок швидкого йонного пучка.....	129
2.7. Хвилі з негативною енергією та пучкові МГД-нестійкості.....	132
2.7.1. Хвилі з позитивною та негативною енергією в пучках заряджених частинок і плазмі.....	132
2.7.2. Енергетичний баланс системи пучок-хвиля.....	135
Питання для самоконтролю.....	143
<b>3. КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ ПУЧКОВИХ НЕСТІЙКОСТЕЙ.....</b>	<b>145</b>
3.1. Дисперсійне рівняння для поздовжніх коливань.....	147
3.2. Дисперсійне рівняння для поздовжніх електростатичних коливань у випадку максвеллової функції розподілу частинок за швидкостями.....	152

3.3. Граничний перехід від кінетичного до МГД-наближення.	
Умова застосовності МГД-наближення .....	158
3.4. Вплив температур пучка та плазми на інкремент нестійкості .....	161
3.5. Поширення гарячого електронного пучка в холодній плазмі.	
Загасання Ландау .....	167
Питання для самоконтролю .....	177
Список використаних джерел .....	178
Предметний покажчик.....	179