

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра прикладної фізики та фізики плазми



В.о. директора ННІ «Фізико-технічний факультет»

Пилип КУЗНСЦОВ

2023 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

**Колективні ефекти в плазмі**

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти	другий (магістр)
галузь знань	10 – «Природничі науки» (шифр і назва)
спеціальність	105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» (шифр і назва)
освітня програма	«Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми» (шифр і назва)
спеціалізація	(шифр і назва)
вид дисципліни	за вибором (обов'язкова / за вибором)
Навчально-науковий інститут	«Фізико-технічний факультет»

2023 / 2024 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою ННІ «Фізико-технічний факультет»  
“25” серпня 2023 року, протокол №8

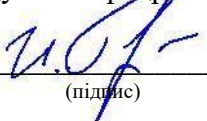
РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)

**Середа Ігор Миколайович** кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент  
кафедри прикладної фізики та фізики плазми

Програму схвалено на засіданні кафедри прикладної фізики та фізики плазми

Протокол від “24” липня 2023 року № 12

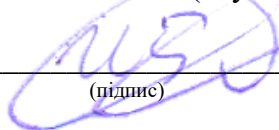
Завідувач кафедри прикладної фізики та фізики плазми

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор ГАРКУША  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми Експериментальна ядерна  
фізика та фізика плазми  
(назва освітньої програми)

Гарант освітньої (наукової) програми

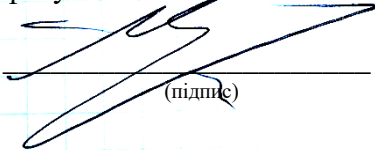
  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор ДЕНИСЕНКО  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено науково-методичною комісією ННІ «Фізико-технічний факультет»

Протокол від “14” серпня 2023 року № 11

Голова науково- методичної комісії ННІ «Фізико-технічний  
факультет»

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Микола ЮНАКОВ  
(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Колективні ефекти в плазмі» складена відповідно до освітньо-наукової програми підготовки другого рівня вищої освіти (магістр). Галузь знань: 10 – “Природничі науки”. Спеціальність: 105 – “Прикладна фізика та наноматеріали”. Освітньо-наукова програма: “Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми”. Фахова орієнтація: “Фізика плазми”.

### 1. Опис навчальної дисципліни

#### 1.1. Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни є засвоєння студентами основних закономірностей в теорії нелінійних явищ при поширенні різних типів хвиль та інтерпретації типових експериментів з цієї тематики. Дисципліна «Колективні ефекти в плазмі» є необхідною складовою підготовки фахівців в галузі фізики плазми, вона містить матеріал засвоєння якого дають студентам компетенції в таких напрямках як радіозв'язок, радіоастрономія, фізика плазми і фізики іоносфери, розповсюдження радіохвиль в реальній плазмі з її численними нестійкостями, шумами, складними нелінійними процесами. Засвоєння фундаментальних фізичних складових, що викладаються в межах дисципліни «Колективні ефекти в плазмі» є умовою для подальшого викладання таких дисциплін як «Плазодинаміка», «Плазмова електроніка та колективні методи прискорення» та «Теорія плазми та стохастичних систем».

#### 1.2. Основні завдання вивчення дисципліни

Загальні компетентності:

- здатність до абстрактного та системного мислення й аналізу (ЗК-2);

Фахові компетентності:

- здатність використовувати сучасну апаратуру при проведенні наукових досліджень (ФК-2);
- здатність використовувати методи аналітичної обробки результатів дослідження та математичного моделювання (ФК-4).

Основними завданнями вивчення дисципліни «Колективні ефекти в плазмі» є засвоєння теоретичних основ нелінійної фізики плазми і фізики іоносфери, розповсюдження радіохвиль в реальній плазмі з її численними нестійкостями, шумами, складними нелінійними процесами.

1.3. Кількість кредитів **9**

1.4. Загальна кількість годин **270**

1.5. Характеристика навчальної дисципліни

Обов'язкова / **за вибором**

Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
5-й	-й
Семестр	
9-й	-й
Лекції	
96 год.	год.
Практичні, семінарські заняття	
-	год.
Лабораторні заняття	
-	год.
Самостійна робота	
174 год.	год.
у тому числі індивідуальні завдання	
60 год.	

### 1.6. Заплановані результати навчання

Згідно з освітньо-науковою програмою «Експериментальна ядерна фізика та фізика плазми» спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» студенти мають досягти таких результатів навчання:

- вибирати методи і моделювати явища та процеси в динамічних системах, а також аналізувати отримані результати (Ум-1);
- самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати отримані результати (Ум-2);
- самостійно виконувати експериментальні дослідження та застосовувати дослідницькі навички за професійною тематикою (Ум-9);

Для цього студенти мають досягти наступних результатів.

#### **Знати:**

- квазілінійну теорію взаємодії електромагнітних хвиль з плазмою;
- магнітогідродинамічну теорію плазми;
- методи обробки та інтерпретації експериментально отриманих результатів.

#### **Вміти:**

- описувати явища переносу в плазмі;
- виділити найбільш важливий ефект в умовах конкретного завдання або експерименту;
- розрахувати основні параметри кінцевого стану, до якого приходить система в результаті фізичних процесів;
- правильно обробляти та інтерпретувати отримані результати.

## 2. Тематичний план навчальної дисципліни

## ***Розділ 1. Лінійні та нелінійні хвилі в плазмі.***

### ***Тема 1. Нелінійні ефекти і фізика плазми.***

Структура курсу «Коллективні ефекти в плазмі» та його зв'язок з іншими курсами, що викладаються студентам. Короткий огляд навчальної літератури та наукових джерел за тематикою лекцій. Лінійне наближення, рамки його застосування. Нелінійне наближення, мета та основні процеси, що виникають при цьому.

### ***Тема 2. Роль нелінійних ефектів при зовнішніх впливах на плазму.***

Дифузія плазми в магнітному полі. Сила тертя електрона при кулонівських взаємодіях. Драйсерівське поле. Механізм генерації швидких частинок. Класифікація нелінійностей.

### ***Тема 3. Лінійні диспергуючі хвилі.***

Дисперсійне співвідношення, загальне рішення у вигляді інтегралу Фур'є. Асимптотичні рішення. Групова швидкість  $v_{gp}$ . Роль  $v_{gp}$  при розповсюдженні хвильового числа  $k$  та частоти  $\omega$ . Роль  $v_{gp}$  при розповсюдженні амплітуди  $A$ . Закон збереження хвиль.

### ***Тема 4. Електронні хвилі в плазмі без магнітного поля.***

Групова  $v_{gp}$  та фазова  $v_{\phi}$  швидкість. Плазмові коливання. Електронні плазмові хвилі. Типові задачі розрахунку дисперсійних співвідношень в різних умовах. Знаходження інкрементів затухання, фаз коливань електричного поля, щільності та потенціалу плазми. Роль іонів при розповсюдженні електронних плазмових хвиль.

### ***Тема 5. Іонні хвилі. Електростатичні хвилі в замагніченій плазмі.***

Звукові хвилі, дисперсійне співвідношення. Іонно-звукові хвилі, дисперсійне рівняння. Рух іонів в полі хвилі. Плазмове наближення. Обґрунтування плазмового наближення. Різниця між іонно-звуковими та плазмовими хвилями. Електростатичні електронні коливання, що розповсюджуються перпендикулярно магнітному полю. Рух частинок в полі хвилі. Верхнє гібридна частота. Дисперсійне рівняння при розповсюдженні електростатичної хвилі під кутом до магнітного поля.

### ***Тема 6. Електромагнітні хвилі.***

Електромагнітні хвилі при  $\vec{B}_0 = 0$ . Фазова та групова швидкості, дисперсійне рівняння, діелектрична проникливість. Ефект відсічки, довжина затухання. Електромагнітні хвилі, що розповсюджуються перпендикулярно  $\vec{B}_0$ . О-хвиля. НО-хвиля. Дисперсійні рівняння. Рух частинок в полях цих хвиль. Відсічки та резонанси. Положення частот відсічок та резонансів на шкалі частот. Електромагнітні хвилі, що розповсюджуються паралельно  $\vec{B}_0$ . Право та ліво-поляризовані хвилі. Дисперсійні рівняння. Рух частинок в полі хвиль. Вістлерна мода. Групова швидкість вістлерів.

### ***Тема 7. Магнітогідродинамічні хвилі.***

Альфвенівська хвиля. Дисперсійне рівняння. Фізичні процеси, що здійснюються в альфвенівській хвилі. Магнітозвукові хвилі. Дисперсійне рівняння. Фізичні процеси, що здійснюються в магнітозвуковій хвилі. Зміщення плазми під дією альфвенівської, магнітозвукової та іонозвукової хвиль.

## ***Розділ 2. Взаємодія хвиль в плазмі.***

### ***Тема 8. Слабкі нелінійності холодної плазми.***

Класифікація нелінійних явищ. Нелінійні рівняння для поля в плазмі. Нелінійні коливання зарядів в холодній плазмі. Нелінійні коливання щільності плазми. Нелінійний струм плазми. Нелінійні рівняння для продольних та поперечних хвиль. Нелінійні рівняння для амплітуд хвиль.

**Тема 9.** *Нелінійна взаємодія трьох пакетів хвиль.*

Пакети хвиль. Фазові співвідношення для пакетів хвиль. Взаємодія пакетів хвиль з фіксованою фазою. Взаємодія пакетів хвиль з випадковою фазою.

**Тема 10.** *Індуковані процеси в плазмі.*

Дворівнева система. Повна ймовірність спонтанного та індукованого випромінювання та поглинання. Кінетичне рівняння для плазмонів. Взаємодія електромагнітної хвилі з дворівневою системою. Пакети хвиль, що взаємодіють як системи з негативною температурою. Нелінійна взаємодія хвиль як результат балансу ефектів індукованого випромінювання і поглинання. Аналогія з ефектом Вавілова-Черенкова.

**Тема 11.** *Загальні властивості і використання розпадних процесів у плазмі.*

Розпадна нестійкість. Закони збереження для процесів розпаду. Процес розпаду ізотропної плазми. Процес розпаду і діагностика плазми. Астрофізичні додатки розпадних взаємодій.

**Тема 12.** *Модуляційна нестійкість.*

Сила ВЧ тиску. Сила Міллера. Критерій Лайтхілла. Якісна картина модуляційної нестійкості. Колапс Ленгмюрівських хвиль.

### **Розділ 3. Хвилі в плазмі при наявності пучків.**

**Тема 13.** *Індуковане розсіювання хвиль частинками плазми.*

Кінетичне рівняння для хвиль. Закони збереження. Деякі загальні сліdstва кінетичних рівнянь для індукованого розсіювання. Індуковане розсіювання хвиль при наявності в плазмі пучків. Механізми розсіювання.

**Тема 14.** *Нелінійні диспергуючі системи. Солітони.*

Рівняння КДВ. Нелінійне рівняння Шредингера. Ленгмюрівські солітони. Трайвелпісовські солітони. Іонно звукові солітони, експеримент по дослідженню. Солітони в зв'язаних хвилях. Солітони в напівпровідниках, діоди Ганна.

**Тема 15.** *Нелінійне випромінювання хвиль частинками плазми.*

Резонансні частинки. Лінійне та нелінійне згасання Ландау, пучкова нестійкість. Експерименти з управління пучкової нестійкістю. Керування пучкової нестійкістю в багато потокових системах. Плазмово-пучковий розряд. Динаміка трьох хвильових процесів в плазмі. Резонансне збудження іонного звуку в системі зустрічних пучків.

**Тема 16.** *Пучки з за критичними швидкостями.*

Нелінійне посилення хвиль пучком з за критичною швидкістю. Кінетичне поширення хвиль в плазмі.

**Тема 17.** *Ехо у неоднорідній плазмі.*

Лінійне просвітлення областей підвищеної щільності плазми хвилями об'ємного заряду.. Лінійне пере випромінювання незвичайної хвилі в плазмі, що знаходиться в неоднорідному магнітному полі. Нелінійне ехо в однорідній плазмі. Механізм виникнення еха. Просторове ехо.

## 3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин												
	денна форма						заочна форма						
	усьог о	у тому числі					ус ь о г о	у тому числі					
		л	п	лаб	інд	С. р.		л	п	ла б.	інд	С. р.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
<b>Розділ 1. Лінійні та нелінійні хвилі в плазмі.</b>													
Тема 1. Нелінійні ефекти і фізика плазми.	14	5			3	6							
Тема 2. Роль нелінійних ефектів при зовнішніх впливах на плазму.	12	4			3	5							
Тема 3. Лінійні диспергуючі хвилі.	14	5			3	6							
Тема 4. Електронні хвилі в плазмі без магнітного поля.	12	5			2	5							
Тема 5. Іонні хвилі. Електростатичні хвилі в замагніченій плазмі.	12	4			3	5							
Тема 6. Електромагнітні хвилі.	14	5			3	6							
Тема 7. Магнітогідродинамічні хвилі.	12	4			3	5							
<b>Разом за розділом 1</b>	<b>90</b>	<b>32</b>			<b>20</b>	<b>38</b>							
<b>Розділ 2. Взаємодія хвиль в плазмі.</b>													
Тема 8. Слабкі нелінійності холодної плазми..	17	6			4	7							
Тема 9. Нелінійна взаємодія трьох пакетів хвиль.	19	7			4	8							
Тема 10. Індуковані процеси в плазмі.	18	7			4	7							
Тема 11. Загальні властивості і використання	18	6			4	8							

розпадних процесів у плазмі.												
Тема 12. Модуляційна нестійкість.	18	6		4	8							
<b>Разом за розділом 2</b>	<b>90</b>	<b>32</b>		<b>20</b>	<b>38</b>							
<b>Розділ 3. Хвилі в плазмі при наявності пучків.</b>												
Тема 13. Індуковане розсіювання хвиль частинками плазми.	17	6		4	7							
Тема 14. Нелінійні диспергуючі системи. Солітони.	19	7		4	8							
Тема 15. Нелінійне випромінювання хвиль частинками плазми.	18	7		4	7							
Тема 16. Пучки з за критичними швидкостями.	18	6		4	8							
Тема 17. Ехо у неоднорідній плазмі.	18	6		4	8							
<b>Разом за розділом 3</b>	<b>90</b>	<b>32</b>		<b>20</b>	<b>38</b>							
<b>Усього годин</b>	<b>270</b>	<b>96</b>		<b>60</b>	<b>114</b>							

**4. Теми практичних, лабораторних занять**  
(не має)

**5. Завдання для самостійної роботи**

№ з/п	Назва теми	Кількість Годин	Форма контролю
<b>Розділ 1. Лінійні та нелінійні хвилі в плазмі.</b>			
1	Дисперсія хвиль у двохрідинної гідродинаміки.	9	Контрольна робота, Курсова робота
2	Лінійні хвилі в диспергуючих середовищах.	10	
3	Енергія і імпульс хвиль.	9	
4	Хвилі в неоднорідних середовищах.	10	
	<b>Разом за Розділом 1</b>	<b>38</b>	
<b>Розділ 2. Взаємодія хвиль в плазмі.</b>			
1	Кінетичне рівняння Больцмана. Різні види інтеграла зіткнень.	10	Контрольна робота,
2	Дисперсійне рівняння для високочастотних поздовжніх (ленгмюрівських) хвиль.	9	



3	Фазові швидкості і інкременти поздовжніх хвиль в ізотропній плазмі.	10	Курсова робота
4	Резистивні дрейфові хвилі.	9	
	<b>Разом за Розділом 2</b>	<b>38</b>	
<b>Розділ 3. Хвилі в плазмі при наявності пучків.</b>			
1	Рух частинок в полі однієї електромагнітної хвилі.	8	Курсова робота
2	Відштовхування частинок з області сильного електромагнітного поля (сила Міллера).	8	
3	Взаємодія частинок плазми з кількома хвилями (умови розсіювання хвиль на частинках і розпадні умови).	8	
4	Нагрівання електронів плазми при проходженні електромагнітних хвиль у слабоіонізованій плазмі. Ефекти кроссmodуляції і самодії хвиль.	7	
5	Колективні процеси за взаємодії пучків заряджених частинок з космічною плазмою.	7	
	<b>Разом за Розділом 3</b>	<b>38</b>	
	<b>Разом</b>	<b>114</b>	

## 6. Індивідуальні завдання

Контрольна робота за Розділом 1. 5 годин самостійної роботи. Контрольна робота містить дві задачі. Оцінювання (10 балів).

Контрольна робота за Розділом 2. 5 годин самостійної роботи. Контрольна робота містить дві задачі. Оцінювання (10 балів).

На написання курсової роботи студентам відводиться 40 годин самостійної роботи. Оцінювання (20 балів). Пропонуються наступні теми:

1. Колективні ефекти в ультрахолодній нейтральній плазмі.
2. Плазмове ехо.
3. Колективні методи прискорення в плазмі.
4. Солітони.
5. Розвиток нестійкості Релея-Тейлора в неоднорідних магнітогазодинамічних течіях.
6. Нагрів плазми електрон-циклотронним резонансом.
7. Задача Мазітова-О'Ніла.
8. Нестійкість пучка в плазмі.
9. Проблема електронів, що втікають.
10. Сильнострумові пучки та пінчі.
11. Нестійкості релятивістських пучків заряджених частинок.

Вимоги до виконання: курсова робота повинна відповідати критеріям ДСТУ 3008-95 «ДОКУМЕНТАЦІЯ. ЗВІТИ У СФЕРІ НАУКИ І ТЕХНІКИ». Оцінювання (20 балів)

Студент може сам обрати тему курсової роботи, якої немає в списку, але тільки за згодою керівника та затвердженні її на засіданні кафедри.

## 7. Методи навчання

При викладанні дисципліни використовуються словесні методи навчання, наочні методи навчання. Головним словесним методом навчання є лекція. Під час проведення лекцій використовуються наступні методи навчання: пояснювально-ілюстративний метод або інформаційно-рецептивний; репродуктивний метод (репродукція - відтворення); метод проблемного викладу; частково-пошуковий, або евристичний метод. Під час самостійної роботи використовуються наступні методи навчання: дослідницький метод.

## 8. Методи контролю

Навчальним планом передбачені наступні методи контролю:

- поточний контроль передбачає 2 контрольні роботи що проводиться на протягом семестру та курсова робота;
- підсумковий семестровий контроль: екзамен в письмовій формі.

## 9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання				Екзамен (залікова робота)	Сума
Розділи	Контрольна робота, передбачена навчальним планом	Курсова робота	Разом		
Розділ 1	10		10		
Розділ 2	10		10		
Розділ 3		20	20		
				60	100

Для допуску до складання підсумкового контролю (заліку, або екзамену) здобувач вищої освіти повинен набрати не менше 20 балів з навчальної дисципліни під час поточного контролю, самостійної роботи, індивідуального завдання.

## Критерії оцінювання навчальних досягнень

Критерії оцінювання **контрольної роботи**. Максимальна кількість балів за контрольну роботу 10 балів. Контрольна робота містить дві задачі.

Критерії оцінювання розв'язання задачі:

- студент отримав загальний розв'язок і правильно вирахував числове значення відповіді – 5 балів;
- студент отримав загальний розв'язок і неправильно вирахував числове значення відповіді – 4 балів;
- студент отримав загальний розв'язок, але помилився в одиницях вимірювання - 3 бали;

- студент правильно вписав необхідні для розв’язання закони та рівняння, але не зміг отримати загальний розв’язок – 2 бали;
- студент не повністю вписав необхідні для розв’язання закони та рівняння – 1 бал;
- студент не правильно вписав необхідні для розв’язку закони та рівняння, чи розв’язок взагалі відсутній – 0 балів.

Критерії оцінювання **курсової роботи**. Максимальна кількість балів за курсову роботу складає 20 балів. Кожна курсова робота оцінюється за 100 бальною шкалою з ваговим коефіцієнтом 0,2. Таким чином, максимальна кількість балів за курсову роботу складає 20 балів.

Курсова робота оцінюються науковим керівником; членами комісії.

1 «Зміст» (30 балів). Оцінюється керівником.

Оцінка складається з оцінок відповідності наступним критеріям: 1) відповідність змісту обраній темі; 2) наявність чітко сформульованої проблеми; 3) адекватність формулювання об’єкта, предмета, мети та задач дослідження; 4) визначення ступеню розробленості проблеми дослідження; 5) наявність посилань на використану літературу та відповідність оформлення роботи стандарту; 6) адекватність обраних методів предмету дослідження, грамотне використання методів (процедура, обробка, інтерпретація результатів); 7) використання методів математичної статистики; 8) відповідність висновків меті та завданням дослідження.

2 «Своєчасність» (10 балів) Передбачає оцінку керівником систематичності виконання роботи та вчасності подання роботи на перевірку науковому керівнику у відповідності із планом виконання курсової роботи.

3 «Дослідницька активність» (10 балів) Оцінюється керівником за рівнем виявленої самостійності та ініціативності під час роботи над курсовою роботою, а саме передбачає оцінку особистого внеску студента (рівень самостійності у пошуку літератури, підборі методів дослідження, вибірки тощо).

4 «Відповідність вимогам до кваліфікаційних робіт» (20 балів) Оцінюється членами комісії за наступними критеріями: 1) вступ: актуальність, об’єкт, предмет, мета, завдання дослідження, перелік методів та характеристика вибірки; 2) 2 розділи: теоретичний (до 8 стор. друк, тексту) та емпіричний (опис методів, процедури дослідження, характеристика вибірки, результати дослідження) підрозділи; 3) наявність висновків наприкінці розділів; 4) кількість джерел (не менше 10); 5) кількість досліджуваних (не менше 20-30 осіб); 6) статистичні методи (обов’язкове використання); 7) висновки (1 - теоретичний та висновки за результатами емпіричного дослідження). «Презентація» (30 балів) оцінюються: чіткість, логічність у викладенні матеріалу, володіння матеріалом, відповіді на питання за змістом роботи.

**Підсумковий контроль** проводиться у формі екзамену. Екзаменаційне завдання (білет) містить два теоретичних питання та задачу.

Критерії оцінювання теоретичного питання:

- повна розгорнута відповідь – 20 балів;
- повна, але не розгорнута відповідь – 18 балів;
- повна, але не розгорнута відповідь, яка містить незначну помилку чи суперечність – 16 балів, за кожну наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал;
- неповна відповідь, яка не містить критичних помилок чи суперечностей – 14 балів, за кожну наступну незначну помилку чи суперечність знімається 1 бал;

- відповідь, що містить критичну помилку чи неточність, або відсутність відповіді оцінюється в 0 балів.

Критерії оцінювання розв'язання задачі:

- студент отримав загальний розв'язок і правильно вирахував числове значення відповіді – 20 балів;
- студент отримав загальний розв'язок і неправильно вирахував числове значення відповіді – 17 балів;
- студент отримав загальний розв'язок, але помилився в одиницях вимірювання – 13 балів;
- студент правильно вписав необхідні для розв'язання закони та рівняння, але не зміг отримати загальний розв'язок – 8 балів;
- студент не повністю вписав необхідні для розв'язання закони та рівняння – 2 бали;
- студент не правильно вписав необхідні для розв'язку закони та рівняння, чи розв'язок взагалі відсутній 0 балів.

Кількість балів, що студент отримав на екзамені, є сумою балів, що були отримані за кожне завдання з екзаменаційного білету.

Кінцева оцінка виставляється за сумою балів поточного та підсумкового контролю за шкалою що наведена нижче.

### Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

### 10. Рекомендована література

1. Akira Hasegawa. Plasma Instabilities and Nonlinear Effects. Springer. 1975.
2. Vadim N. Tsytovich. Nonlinear Effects in Plasma. Springer. 2012.
3. Francis F. Chen. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. Springer. 2016.

### 11. Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення

1. <http://dspace.univer.kharkov.ua/>
2. <http://twirpx.com>