

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор

Микола ШУЛЬГА

« 29 »

2017 р.



РОБОЧА ПРОГРАМА  
навчальної дисципліни

**Плазмодинаміка та плазмові технології**

Назва навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти

Доктор філософії

галузь знань

10 Природничі науки

спеціальність

104 фізика та астрономія

освітня програма

освітньо-професійна програма «Фізика та астрономія»

спеціалізація

вид дисципліни  
Інститут

обов'язкова  
Інститут Фізики Плазми ННЦ ХХФТІ

Програму рекомендовано до затвердження  
Науково-технічною радою ННЦ ХФТІ

Від "07" 12 2017 року, протокол № 9

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

д.ф.-м.н., професор, академік НАН України

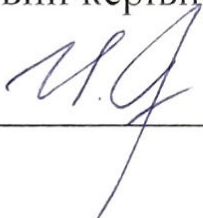
Заступник Генерального директора ННЦ ХФТІ з наукової роботи

ГАРКУША Ігор Євгенійович

Програму схвалено на засіданні Науково-технічної ради Інституту  
фізики плазми \_\_\_\_\_

Від "25" 10 2017 року, протокол № 7

Науковий керівник Інституту Фізики Плазми ННЦ ХФТІ

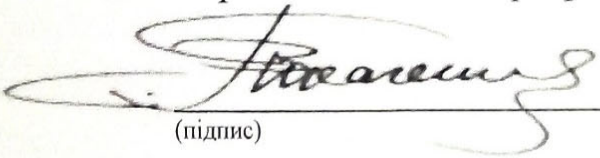
  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор ГАРКУША  
\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Програму погоджено з гарантом освітньо-професійної програми  
«Фізика та астрономія»

назва освітньої програми

Гарант освітньо-професійної програми «Фізика та астрономія»

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Віктор ТКАЧЕНКО  
\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Програма навчальної дисципліни “Плазмодинаміка та плазмові технології” складена відповідно до освітньонаукової програми підготовки третього (аспірант) рівня вищої освіти. Галузь знань: 10 – “Природничі науки”. Спеціальність: 104 – “фізика і астрономія”. Фахова орієнтація: “Фізика плазми”.

## **1. Опис навчальної дисципліни**

### **1.1. Мета викладання навчальної дисципліни.**

Метою викладання навчальної дисципліни є надання знань про основні властивості плазми, що рухається, зокрема, основні механізми прискорення плазми та компенсованих пучків різноманітних іонів, типи джерел рухомої плазми та іонів, плазмооптичні системи, взаємодію плазми з різноманітними магнітними полями, використання потоків плазми, в тому складі для плазмових технологій.

### **1.2. Основні завдання вивчення дисципліни.**

Загальні компетентності:

- здатність до абстрактного та системного мислення й аналізу;
- здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел;
- здатність працювати автономно;

Фахові компетентності:

- здатність використовувати сучасну апаратуру при проведенні наукових досліджень;
- здатність використовувати методи аналітичної обробки результатів дослідження та математичного моделювання;
- здатність використовувати сучасні теоретичні уявлення в галузі фізики для аналізу фізичних систем;
- здатність виконувати обчислювальні експерименти, використовувати чисельні методи для розв’язування фізичних задач і моделювання фізичних систем;
- Основними завданнями вивчення дисципліни “Плазмодинаміка” є надання аспірантам знань та навичок, достатніх для усвідомленої самостійної постановки та розв’язання задач (в першу чергу – якісного та оціночного характеру), що виникають під час професійної діяльності з приводу динаміки плазми або електродинамічних явищ, а також для розробки стратегії розв’язання більш серйозних проблем, повністю або частково пов’язаних з прискоренням плазми в імпульсних (ІПП) і квазістаціонарних плазмових прискорювачах (КСПП), спрощених та повноблочних КСПП, принципів формування компресійних течій плазми, генерації плазми в стаціонарних та квазістаціонарних прискорювачах з замкненим дрейфом електронів (прискорювачі з анодним шаром, прискорювачі з замкненим дрейфом та протяжною зоною генерації іонів) і еквіпотенціальними магнітними поверхнями для фокусування потоків плазми.

### **1.3. Кількість кредитів 4**

### **1.4. Загальна кількість годин 120**

## 1.5. Опис навчальної дисципліни «Плазмодинаміка та плазмові технології»

| Галузь знань, напрям підготовки, спеціальність, освітньо-кваліфікаційний рівень |                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Галузь знань                                                                    | 10 – Природничі науки           |
| напрямок підготовки                                                             | 104 – фізика та астрономія      |
| спеціальність                                                                   |                                 |
| освітньо-кваліфікаційний рівень                                                 | Доктор філософії                |
| Мова навчання                                                                   | Українська, англійська          |
| Характеристика навчальної дисципліни                                            |                                 |
| Вид                                                                             | Обов'язкова за вибором ННЦ ХФТІ |
| Загальна кількість годин                                                        | 120                             |
| Кількість кредитів ECTS                                                         | 4                               |
| Кількість змістових модулів                                                     | 2                               |
| Форма контролю                                                                  | іспит                           |
| Показники навчальної дисципліни                                                 |                                 |
| Рік підготовки                                                                  | II                              |
| Лекційні заняття                                                                | 32                              |
| Практичні заняття                                                               | 16                              |
| Самостійна робота                                                               | 70                              |
| Консультації                                                                    | 2                               |

## 1.6. Передумови для вивчення дисципліни.

Передумовою вивчення дисципліни є базова освіта магістерського рівня в галузі фізики, лекційний курс основи фізики плазми, що викладається раніше або паралельно.

## 1.7. Заплановані результати навчання:

Згідно з освітньо-науковою програмою аспіранти мають досягти таких результатів навчання:

- вибирати методи і моделювати явища та процеси в динамічних системах, а також аналізувати отримані результати;
- самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати отримані результати;
- самостійно виконувати експериментальні дослідження та застосовувати дослідницькі навички за професійною тематикою;
- аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення.

Для цього аспіранти мають досягти наступних результатів.

**Знати:**

- принципи плазмодинаміки;
- основи генерації плазмових потоків;
- використання плазмодинамічних систем в наукових дослідженнях та технологіях
- методи обробки та інтерпретації експериментально отриманих результатів.

#### **Вміти:**

- описувати плавомехімічні явища у 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.

Обізнаність пспірантів з принципами плазмодинаміки, а саме у генерації плазмових потоків, діагностики та використання плазмодинамічних систем в наукових дослідженнях та технологіях.

## **ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

### **2. Тематичний план навчальної дисципліни**

#### **МОДУЛЬ 1**

**Розділ 1.** Предмет плазмодинаміки і основні завдання.

**Тема 1.** Загальна, лабораторна і космічна плазмодинаміка. Плазмодинаміка середніх енергій. Про різноманіття стаціонарних і імпульсних генераторів плазмових потоків. Прискорювачі заряджених частинок, теплові та плазмодинамічні системи. Іонні інжектори. Закон Ленгмюра- Чайльда. Основні характеристики пучків: первеанс, емітанс, яскравість і ін. Квазіпірсова система. Три випадки вилучення іонів з плазмового джерела. **Тема 2.** Плазмові прискорювачі. Класифікація прискорювачів. Теплові, електромагнітні та термомагнітні прискорювачі. Стаціонарні та імпульсні пристрої, Прискорювачі із зовнішнім магнітним полем і сильнострумові прискорювачі з власним МП.

**Тема 3.** Механізми прискорення в плазмі. Умова існування і способи підтримки електричного поля в плазмі. Поля Лоренца, Больцмана і Векслера. Релаксаційні процеси в плазмі всередині кожної з компонент і між компонентами.

**Розділ 2.** Імпульсні прискорювачі плазми.

**Тема. 4.** Модель струмового перемички. Модель «снігового плуга». (Snow plough). Турбулентний механізм прискорення.

**Тема 5.** Конструкції прискорювачів. Найпростіші приклади: джерело Бостіка, прискорювач Альфвена, плазмова гармата Маршала. Основні результати експериментів на ІПУ. Фізичні процеси в реальному ІПУ. Прискорювачі ерозійного типу.

**Розділ 3.** Особливості діагностики щільною рухомою плазми.

**Тема 6.** Аналіз електротехнічних характеристик. Зондові методи аналізу полів і струмів. Калориметри, п'єзодетектори і болометри. Корпускулярні методи. Спектральнооптичні методи. Інтерферометрія потоків плазми.

**Тема 7.** Плазмовий фокус. Пінч розряди. Пінч-ефект, рівновага в Пінчі, співвідношення Беннета. Z-пінч, капілярний розряд. Нестійкості пінча. Нестійкість РелеяТейлора і Кельвіна-Гельмгольца. Різні модифікації плазмового фокуса (геометрія Філіппова і Мейзера).

**Тема 8.** Особливості організації електричного розряду в системах плазмового фокуса. Стадії розряду в ПФ (breakdown, rundown, pinch). Вимоги до енергетики. Особливості газового напуску. Характеристики розряду в системах ПФ. Характеристики електромагнітного випромінювання ПФ.

**Тема 9.** Закони подібності для інтенсивності нейтронного випромінювання ПФ. Часові та просторові характеристики потоків швидких іонів та електронів, що генеруються в системах ПФ. Деякі технологічні застосування

**Тема 10.** Динаміка одиночних частинок в схрещених  $E$ ,  $H$  полях. Дрейфовий наближення. Умови його застосовності. Гідродинамічні моделі плазми. Дворідинна гідродинаміка. Магнітна гідродинаміка. Параметри подібності в МГД. Формалізм функцій потоку. Епюри прискорювача / компресора.

**Тема 11.** Вмороженість магнітного поля в плазму. Явища вмороженості в рамках одночасткових уявлень. Електродинамічна формулювання явища вмороженості. Параметри вмороженості. Магнітозвукові обурення, що поширюється поперек магнітного поля. Тиск магнітного поля. Амперова сила і тензор натягу Максвелла. Магнітний тиск і натяг. Статичні МГД-конфігурації.

**Тема 12.** Моделі течій плазми в каналах кінцевої ширини. Рівняння для функції потоку в дворідинній моделі плазми. Ізомагнітні і ізобернулєві течії. Наближення повільно змінюваного каналу. Ізобернулєва течія холодної плазми в каналі. Прискорювальний режим течії плазми у вузькому каналі. Компресійні течії.

**Тема 13.** Квазістаціонарні плазмові прискорювачі (КСПП). прискорювальний і компресійний режими роботи. Вибір профілю каналу. Перехід течії через швидкість звуку. Про вхідний і вихідний зонах КСПП. iv. Зв'язок параметрів потоку з електротехнічними характеристиками. Основні рівняння. Поняття кризи струму. Іонний перенос струму. Двоступеневий режим роботи КСПП. Компонування прискорювачів. Основні результати експериментів. Застосування КСПП і МПК в плазмових технологіях і УТС.

**Тема 14.** Стаціонарні прискорювачі плазми із зовнішнім магнітним полем. Холлівські прискорювачі. Прискорювачі із замкнутим дрейфом електронів. Основні рівняння динаміки електронів та іонів. Параметр Холла, замагніченість електронів. Компоненти електронного струму. Пристінкова провідність. Результати досліджень. Використання з якості електрореактивних космічних двигунів.

### Розділ 3. Плазмооптика.

**Тема 15.** Приклади систем вакуумної корпускулярної оптики, фокусування електричним і магнітним полем. Фокусні відстані. Недоліки вакуумної корпускулярної оптики. Аберації. Умови еквіпотенціалізації магнітних силових ліній в плазмі. Основні характеристики плазмової лінзи. Принципова схема плазмової лінзи. Фокусна відстань плазмової лінзи.

Співвідношення фокусної відстані плазмової лінзи з фокусною відстанню магнітної і електричної лінзи. Критичні умови, при яких порушується робота плазмової лінзи.

**Тема 16.** Конкретні плазмові лінзи. Схема експериментальної установки. Характеристики фокусування плазмової лінзи. Способи задання електричних полів в плазмовій лінзі. Сферична аберація. Залежність фокусування від величини магнітного поля. Граничні характеристики плазмових потоків і їх зв'язок з параметрами лінзи.

## МОДУЛЬ 2.

### Розділ 4. Рух плазми в зовнішніх магнітних полях.

**Тема 17.** Рух плазми в зовнішніх магнітних полях. Рух плазми в аксіальносиметричному наростаючому магнітному полі. Рух плазми в криволінійному магнітному полі. Поняття сепарації частинок. Рух щільної плазми в тороїдальному магнітному полі. **Тема 18.** Рух плазми в поперечному магнітному полі. Стаціонарний плазмовий потік в слабо неоднорідному поперечному магнітному полі. Умова слабого зміни магнітного поля. Поляризація потоків плазми. Умова рівноваги плазми. Максимальний діаманітний струм в плазмі. Умови і можливості закорочування полів поляризації в плазмі. Гальмування потоків плазми.

**Тема 19.** Дифузія плазми в магнітне поле. Вхід плазмового потоку в магнітне поле. Рух плазми в просторово-періодичному магнітному полі. Умови резонансного перерозподілу енергії між компонентами іонів потоків плазми.

**Тема 20.** Інжекція нейтралів в замкнуті пастки. Метод нагріву плазми пучками атомів. Релаксація енергії інжекттованих частинок. Вибір енергії інжекттованих частинок. Критерій Стікса. Вибір інших параметрів пучка. Баланс енергії. Загальна схема реалізації методу нагріву плазми пучками частинок. Основні вимоги до інжекторам частинок. Інжектори нейтралів. Потужнострумові джерела іонів.

**Тема 21.** Типи джерел. Багатоапертурні джерела іонів. Нейтралізація пучків частинок. Сепарація пучків. Рекуперація енергії іонів. Загальна компоновка інжекторів. Основні технічні вимоги. Діагностика пучків атомів та інжекторів.

**Тема 22.** Технологічні застосування дугових прискорювачів плазми. Максимально допустимі потоки енергії на підкладку. Діаграма на площині «щільність частинок - енергія на частку», діапазон роботи різних джерел металевої плазми. Вакуумна дуга. Катодна форма вакуумної дуги. Основні Характеристики розряду. Типи катодних плям. Умови стаціонарного існування дуги. Потік енергії в катод.

**Тема 23.** Рух катодних плям в магнітному полі. Енергія прискорених іонів і механізми їх прискорення. Величина критичного струму, при якому можливе стаціонарне існування вакуумної дуги. Вакуумна дуга з контрагованою анодною плямою. Умова переходу до форми вакуумної дуги з контрагованою анодною плямою. Стаціонарний прискорювач металевої плазми на основі вакуумної дуги. Вимоги до характеристик дугового розряду в стаціонарних прискорювачах. Конструктивні особливості та принцип роботи. Автостабілізація і стабілізація розряду зовнішнім магнітним полем. Параметри плазмових потоків.

**Тема 24.** Імпульсні прискорювачі металевої плазми (катодний режим).

Середній рівень потужності прискорювача. Критична величина імпульсного заряду. Управління швидкістю і кутом розльоту плазмового струменя за допомогою магнітного поля. Параметри імпульсних прискорювачів металевої плазми. Основні переваги методу

отримання плівкових покриттів. з використанням імпульсних прискорювачів металевої плазми.

**Тема 25.** Потужний імпульсний прискорювач, який працює в анодному режимі. Умови переходу до квазістаціонарних стадії процесу ерозії. Час встановлення цього режиму. Механізм прискорення плазми. Величина масової витрати за імпульс. Переваги даного прискорювача при нанесенні проводять плівок.

**Тема 26.** Металізація в вакуумі торцевими плазмовими прискорювачами. «Гарячі» катоди, які постачають в розряд легкоплавкі метали. Максимальна величина витрат речовини. Швидкість витікання плазми. Параметри плазмових струменів. Застосування фокусування плазми (плазмова оптика).

## Розділ 5. Процеси конденсації та розпилення.

**Тема 27.** Метод конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ). Physical Vapor Deposition. 1. Ідеологія методу нанесення покриттів на поверхні матеріалів методом КІБ. Залежність процесів конденсації і розпилення від енергії іонів плазми. Основні параметри, що визначають властивості конденсату.

**Тема 28.** Попередня чистка поверхонь матеріалів. Методи чистки поверхні зразків і деталей перед осадженням покриттів. Роль температури поверхні зразків в якості нанесених покриттів. Роль потенціалу зміщення зразків в процесах очищення у разі необхідності і конденсації. Основні параметри, що визначають властивості конденсату

**Тема 29.** Експериментальні установки. Установки типу «Булат». Застосування плазмооптичних систем для фокусування потоків плазми. Застосування магнітних сепараторів для сепарації іонів і зменшення крапельної фракції. Умова проходження через криволінійний магнітний фільтр.

**Тема 30.** Параметри плазми при нанесенні покриттів. Основні характеристики приповерхневої плазми. Розподіл іонів по енергіях і Зарядовий стан. Рециклінг. Приповерхневі шари. Процеси на поверхні.

**Тема 31.** Алмазоподібні вуглецеві покриття. Використання комбінованих височастотних і дугових розрядів для нанесення покриттів. Модифікація поверхонь матеріалів імпульсними потоками газоподібної плазми. Механізм модифікації поверхонь, що опромінюються потоками плазми. Мікротвердість, зносостійкість, корозійна стійкість поверхневих шарів опромінених матеріалів.

**Тема 32.** Використання потужних прискорювачів плазми для моделювання процесів на першій стінці і диверторних пластинах термоядерного реактора. Утворення перехідних шарів щільної плазми. Ерозійні характеристики матеріалів, що опромінюються. Механізми ерозії матеріалів в термоядерних установках.

Інші застосування плазмових технологій і плазмових джерел. Прилади на основі діелектричного бар'єрного розряду. ДБР люмінесцентні лампи, ДБР стерилізатори, озонатори.

## 3. Структура навчальної дисципліни

|                      |                 |              |   |     |     |      |
|----------------------|-----------------|--------------|---|-----|-----|------|
| Назви розділів і тем | Кількість годин |              |   |     |     |      |
|                      | денна форма     |              |   |     |     |      |
|                      | усього          | у тому числі |   |     |     |      |
|                      |                 | л            | п | лаб | кон | с.р. |

|                                                                                                       |    |    |   |   |   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|---|---|---|----|
| 1                                                                                                     | 2  | 3  | 4 | 5 | 6 | 7  |
| <b>Модуль I</b>                                                                                       |    |    |   |   | 1 |    |
| Розділ 1.                                                                                             |    |    |   |   |   |    |
| Тема 1. Загальна, лабораторна і космічна плазмодинаміка.                                              | 3  | 1  | - | - | - | 2  |
| Тема 2. Плазмові прискорювачі.                                                                        | 3  | 1  | - | - | - | 2  |
| Тема 3. Механізми прискорення в плазмі.                                                               | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Розділ 2.                                                                                             |    |    |   |   | - |    |
| Тема 4. Модель струмового перемички.                                                                  | 3  | 1  | - | - | - | 2  |
| Тема 5. Конструкції прискорювачів.                                                                    | 3  | 1  | 2 | - | - | -  |
| Розділ 3. Особливості діагностики щільною рухомою плазми.                                             |    |    |   |   |   |    |
| Тема 6. Аналіз електротехнічних характеристик.                                                        | 4  | 1  | 2 | - | - | 1  |
| Тема 7. Плазмовий фокус.                                                                              | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 8. Особливості організації електричного розряду в плазмових фокусах.                             | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 9. Закони подібності для інтенсивності нейтронного випромінювання ПФ.                            | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 10. Динаміка частинок в схрещених Е, Н полях. Дрейфове наближення.                               | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 11. Вмороженість магнітного поля в плазму.                                                       | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 12. Моделі течій плазми в каналах кінцевої ширини.                                               | 4  | 1  | - | - | - | 2  |
| Тема 13. Квазістаціонарні плазмові прискорювачі (КВПУ). прискорювальний і компресійний режими роботи. | 4  | 1  | 2 | - | - | 1  |
| Тема 14. Стаціонарні прискорювачі плазми із зовнішнім магнітним полем.                                | 4  | 1  | 2 | - | - | 1  |
| Розділ 3.                                                                                             |    |    |   |   |   |    |
| Тема 15. Приклади систем вакуумної корпускулярної оптики, фокусування електричним і магнітним полем.  | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 16. Конкретні плазмові лінзи.                                                                    | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| <b>Разом Модуль I:</b>                                                                                | 60 | 16 | 8 |   | 1 | 35 |
| <b>Модуль II.</b>                                                                                     |    |    |   |   | 1 |    |
| Розділ 4.                                                                                             |    |    |   |   |   |    |
| Тема 17. Рух плазми в зовнішніх магнітних полях.                                                      | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 18. Рух плазми в поперечному магнітному полі.                                                    | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 19. Дифузія плазми в магнітне поле.                                                              | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 20. Інжекція нейтралів в замкнуті пастки.                                                        | 4  | 1  | - | - | - | 3  |
| Тема 21. Типи джерел. Багатоапертурні джерела іонів.                                                  | 4  | 1  | 2 | - | - | 1  |

|                                                                                                                                               |            |           |           |          |          |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| Тема 22. Технологічні застосування дугових прискорювачів плазми.                                                                              | 4          | 1         | -         | -        | -        | 3         |
| Тема 23. Рух катодних плям в магнітному полі.                                                                                                 | 4          | 1         | -         | -        | -        | 3         |
| Тема 24. Імпульсні прискорювачі металевої плазми.                                                                                             | 4          | 1         | -         | -        | -        | 3         |
| Тема 25. Потужний імпульсний прискорювач.                                                                                                     | 4          | 1         | 2         | -        | -        | 1         |
| Тема 26. Металізація в вакуумі торцевими плазмовими прискорювачами.                                                                           | 4          | 1         | -         | -        | -        | 3         |
| Розділ 5.                                                                                                                                     |            |           |           |          |          |           |
| Тема 27. Метод конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ).                                                                                     | 4          | 1         | 2         | -        | -        | 1         |
| Тема 28. Методи чистки поверхні зразків і деталей перед осадженням покриттів.                                                                 | 4          | 1         | 2         | -        | -        | 1         |
| Тема 29. Експериментальні установки.                                                                                                          | 4          | 1         | -         | -        | -        | 3         |
| Тема 30. Параметри плазми при нанесенні покриттів.                                                                                            | 2          | 1         | -         | -        | -        | 1         |
| Тема 31. Алмазоподібні вуглецеві покриття.                                                                                                    | 2          | 1         | -         | -        | -        | 1         |
| Тема 32. Використання потужних прискорювачів плазми для моделювання процесів на першій стінці і диверторних пластинах термоядерного реактора. | 4          | 1         | -         | -        | -        | 2         |
| <b>Разом Модуль II:</b>                                                                                                                       | <b>60</b>  | <b>16</b> | <b>8</b>  | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>35</b> |
| <b>Усього годин:</b>                                                                                                                          | <b>120</b> | <b>32</b> | <b>16</b> | <b>0</b> | <b>2</b> | <b>70</b> |

**Загальний обсяг: 120 год., зокрема: лекцій – 32 год.; практичних/семінарів – 16 год., самостійної роботи – 70 год., консультацій – 2 год.**

#### **4. Методи навчання**

Оффлайн-навчання – аудиторне навчання за всіма традиційними формами.

E-learning - презентації, презентації з анімацією, відеофільми, онлайн сайти та інше.

Асинхронне навчання –при консультуванні через електронну пошту.

**5. Методи контролю** Навчальним планом передбачені наступні методи контролю:  
Контрольна робота за матеріалами першого та другого модулю  
Іспит

#### **6. Схема нарахування балів Модуль I.**

| Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання |                                                  |                        |       | Сума |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------|-------|------|
| Самостійна робота                                            | Контрольні роботи, передбачені навчальним планом | Індивідуальне завдання | Разом |      |
| -                                                            | 60                                               | 40                     | 100   | 100  |

## Модуль II.

| Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання |                                                              |                           |       | Екзамен<br>(залікова<br>робота) | Сума |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|---------------------------------|------|
| Самостійна робота                                            | Контрольні<br>роботи,<br>передбачені<br>навчальним<br>планом | Індивідуальне<br>завдання | Разом |                                 |      |
| -                                                            | 25                                                           | 15                        | 40    | 60                              | 100  |

**7. Критерії оцінювання виконання завдань контрольної роботи Модуль 1.**

1. Контрольна робота складається з 6 завдань, кожне завдання оцінюється за 10 бальною шкалою.
2. Загальна оцінка виконання контрольної роботи є єдиною оцінкою за виконання всіх завдань роботи.
3. Бали з оцінки кожного завдання знімаються за : – принципові помилки, тобто помилки, що свідчать про нерозуміння сутності проблеми, використання хибних науково-технологічних положень – від 5 до 10 балів;
  - вагомі помилки, тобто помилки, що свідчать про спрощений підхід до розгляду питання та відсутність належного аналізу – від 4 до 7 балів.
  - помилки за неуважністю та неакуратністю, вживання сленгу та ненаукової термінології - від 1 до 4 балів.
4. Виконання контрольної роботи оцінюється сумою балів.

**8. Критерії оцінювання виконання завдань роботи Модуль 2.**

1. Залікова робота складається з 4 завдань, кожне завдання оцінюється за 10 бальною шкалою.
2. Загальна оцінка виконання залікової роботи є єдиною оцінкою за виконання всіх завдань роботи.
3. Бали з оцінки кожного завдання знімаються за :
  - принципові помилки, тобто помилки, що свідчать про нерозуміння сутності проблеми, використання хибних науково-технологічних положень – від 5 до 10 балів;
  - вагомі помилки, тобто помилки, що свідчать про спрощений підхід до розгляду питання та відсутність належного аналізу – від 4 до 7 балів.
  - помилки за неуважністю та неакуратністю, вживання сленгу та ненаукової термінології - від 1 до 4 балів.
4. Виконання залікової роботи оцінюється сумою балів.

**9. Критерії оцінки екзаменаційної роботи.**

1. Екзаменаційна робота складається з 3 завдань, кожне завдання оцінюється за 20 бальною шкалою.

2. Загальна оцінка виконання екзаменаційної роботи є єдиною оцінкою за виконання всіх завдань роботи.
3. Бали з оцінки кожного завдання знімаються за :
  - принципові помилки, тобто помилки, що свідчать про нерозуміння сутності проблеми, використання хибних науково-технологічних положень – від 10 до 20 балів;
  - вагомні помилки, тобто помилки, що свідчать про спрощений підхід до розгляду питання та відсутність належного аналізу – від 5 до 10 балів.
  - помилки за неувважністю та неакуратністю, вживання сленгу та ненаукової термінології - від 1 до 5 балів.
4. Виконання екзаменаційної роботи оцінюється сумою балів.

### 10 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                    |

### 11. Рекомендована література

#### Основна література

1. Dendy R.O. Plasma Dynamics (Oxford Science Publications) Clarendon Press; 1990 - 176 с. ISBN-13 : 978-0198520412
2. Morozov A.I. Introduction to Plasma Dynamics, Tailor and Francis pub. 2013, ISBN 9780429111631, <https://doi.org/10.1201/b13929>
3. Davidson P.A. An Introduction to Magnetohydrodynamics. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. doi:10.1017/CBO9780511626333
4. Rosa, R.J. Magnetohydrodynamic energy conversion. United States: N. p., 1987.
5. Shercliff, J.A. A Textbook of Magnetohydrodynamics, Pergamon Press, Oxford, 1965.
6. Molokov S., Moreau R., Moffat H.K. Magnetohydrodynamics. Historical Evolution and Trends, Springer Verlag, 2007.
7. Sutton, G.W., Sherman, A. Engineering Magnetohydrodynamics, Dover Publications, 2006. ISBN 978-0486450322.
8. Morozov, A.I. and Balebanov, V.M. (2003). Plasma Thrusters. In Encyclopedia of Space Science and Technology, H. Mark (Ed.). <https://doi.org/10.1002/0471263869.sst063>.
9. Goebel D.M., Katz I., Mikellides I.G. Fundamentals of Electric Propulsion, 2nd Edition, 2023, ISBN: 978-1-394-16323-6.

10. Morozov, A.I., Solov'ev, L.S. (1980). Steady-State Plasma Flow in a Magnetic Field. In: Leontovich, M.A. (eds) Reviews of Plasma Physics. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7814-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7814-7_1)
11. Brushlinskii, K.V., Morozov, A.I. (1980). Calculation of Two-Dimensional Plasma Flows in Channels. In: Leontovich, M.A. (eds) Reviews of Plasma Physics, Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7814-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7814-7_2)
12. Morozov, A.I., Lebedev, S.V. (1980). Plasma Optics. In: Leontovich, M.A. (eds) Reviews of Plasma Physics. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7814-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7814-7_4)
13. Morozov, A.I. The conceptual development of stationary plasma thrusters. Plasma Phys. Rep. 29, 235–250 (2003). <https://doi.org/10.1134/1.1561119>.
14. Morozov, A.I., Savelyev, V.V. (2000). Fundamentals of Stationary Plasma Thruster Theory. In: Kadomtsev, B.B., Shafranov, V.D. (eds) Reviews of Plasma Physics, vol 21. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4309-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4309-1_2)
15. Gabovich M.D., Pleshivtsev N.V., Semashko N.N. Ion and Atomic Beams for Controlled Fusion and Technology, 1989.
16. Huddleston R.H., Leonard S. L. Plasma Diagnostic Techniques, Academic Press, 1965.
17. Hutchinson I.H. Principles of Plasma Diagnostics, Cambridge University Press, 2005.
18. Brown I.G. The Physics and Technology of Ion Sources, 2004. <https://doi.org/10.1002/3527603956>
19. Gillespie, G H, Kuo, Yu-Yun, and Keefe, D. Wangler, T.P. High-current, high-brightness, and high-duty factor ion injectors. AIP conference proceedings No. 139. United States: N.p., 1986.
20. Stockli, Martin P, and Nakagawa, Takahide. Ion Injectors for High-Intensity Accelerators. United States: N. p., 2013.
21. Nastasi M., Mayer J.W., Hirvonen J.K. Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications, Cambridge University Press, 1996.
22. Eliezer S., Eliezer Y. The fourth state of matter. An introduction to plasma science. IOP, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 201, 224 c.
23. Chen F.F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Springer International Publishing Switzerland, 2016, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22309-4>
24. Dendy R.O. Plasma Physics: An Introductory Course, Cambridge University Press, 1995.
25. Humphries S. Charged Particle Beams, Wiley-Interscience, 2002.
26. Jahn R.G. Physics of Electric Propulsion, Dover Publications, 2006.
27. Molokovsky S.I., Sushkov A.D. Intense Electron and Ion Beams, Springer, 2005.
28. Piel A. Plasma Physics. An Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas, Springer International Publishing AG, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63427-2>
29. Boyd T.J.M., Sanderson J.J. The Physics of Plasmas, Cambridge University Press; 2003. doi:10.1017/CBO9780511755750
30. Bellan P.M. Fundamentals of Plasma Physics, Cambridge University Press; 2006. doi:10.1017/CBO9780511807183
31. Diver D.A. Plasma Formulary for Physics, Astronomy, and Technology, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2013.
32. Huba J.D. 2013 NRL Plasma Formulary, Naval Research Laboratory, 2013.

#### Допоміжна література

1. Features of materials alloying under exposures to pulsed plasma streams. European Physical Journal D. 54, (2009) 185–188 V.A.Makhlai, I.E.Garkusha, A.N. Bandura et al.
2. Experimental study of plasma energy transfer and material erosion under ELM-like heat loads. Journ. Nucl. Mater. 2009, v.390-391, p.814-817. I.E. Garkusha, V.A. Makhlaj, V.V. Chebotarev
3. PLASMA 2007, editors: H-J.Hartfuss, M. Dudeck, J.Musielok, M.J. Sadowski. AIP, CP993, 2008, I.E. Garkusha, V.V. Chebotarev, A. Hassanein et al., Dynamics of Xenon Plasma Streams generated by Magnetoplasma Compressor. p.341-344.
4. V.V.Chebotarev, I.E.Garkusha, I.S.Landman et al. Application of quasi-steady-state plasma streams for material studies. p.371378.
5. O.V. Byrka, V.V. Chebotarev, I.E. Garkusha et al. Application of powerful quasi-steady-state plasma accelerators for simulation of ITER transient heat loads on divertor surfaces. Plasma Phys. Control. Fusion, 49 (2007) A231-A239.
6. I.O. Misiruk, O.I. Timoshenko, V.S. Taran, I.E Garkusha. Application of plasma nitriding in medical implants post-processing. Plasma Physics and Technology, Vol. 1, № 2, 2014, p.58.
7. I.E. Garkusha, T.N. Cherednychenko, M.S. Ladygina, V.A. Makhlay, Yu.V. Petrov, D.G. Solyakov, V.V. Staltsov, D.V. Yelisyeyev, A. Hassanein. EUV Radiation from Pinching Discharges of MPC Type and its Dependence on Dynamics of Compression Zone Formation. Physica Scripta T161 (2014) 014037.
8. I.E. Garkusha. High current plasma accelerators: physics and applications. «Journal of Kharkiv National University», № 1040, 2013 physical series «Nuclei, Particles, Fields», issue 1 /57/ pp.28-39.
9. V.I. Tereshin. Quasi-stationary plasma accelerators (QSPA) and their applications. Plasma Physics and Controlled Fusion. Volume 37 (1995) pp. 177-190.
10. Mahan J.E., Physical vapor deposition of thin films. Wiley, New York, 2000, 312 c.
11. H. Alfven. Cosmical Electrodynamics, 248 p.

**Посилання на інформаційні ресурси в Інтернеті, відео-лекції, інше методичне забезпечення**

Plasma and Plasma Physics, UKAEA Webinars  
<https://www.youtube.com/watch?v=E8Fqdg4eI00>