

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Фізичний факультет  
(назва факультету)

Кафедра фізики металів

  
«23» березня 2025 року

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ  
ДИСЦИПЛІНИ**

Фізика нерівноважних відкритих систем  
(повна назва навчальної дисципліни)

**для студентів**

|                  |                                                                       |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| галузь знань     | <u>Е Природничі науки, математика та статистика</u><br>(шифр і назва) |
| спеціальність    | <u>Е5 Фізика та астрономія</u><br>(шифр і назва спеціальності)        |
| освітня програма | <u>Фізика наносистем</u><br>(назва освітньої програми)                |
| освітній рівень  | <u>магістр</u><br>(молодший бакалавр, бакалавр, магістр)              |
| вид дисципліни   | <u>обов'язкова</u>                                                    |

|                                            |                   |
|--------------------------------------------|-------------------|
| Форма навчання                             | <u>денна</u>      |
| Навчальний рік                             | <u>2025/2026</u>  |
| Семестр                                    | <u>2</u>          |
| Кількість кредитів ECTS                    | <u>3</u>          |
| Мова викладання, навчання<br>та оцінювання | <u>українська</u> |
| Форма заключного контролю                  | <u>залік</u>      |

Викладачі: доцент Шевченко Вікторія Богданівна

(Науково-педагогічні працівники, які забезпечують викладання даної дисципліни у відповідному навчальному році)

Пролонговано: на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.  
(підпис, ПІБ, дата)

на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.  
(підпис, ПІБ, дата)

на 20\_\_/20\_\_ н.р. \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_) «\_\_» 20\_\_ р.  
(підпис, ПІБ, дата)

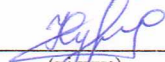
**КИЇВ – 2025**

Розробники: Шевченко Вікторія Богданівна, кандидат фіз.-мат. наук, доцент  
кафедри фізики металів

*(вказати авторів: ПІБ, науковий ступінь, вчене звання, посада, кафедра)*

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри фізики металів

  
(підпис)

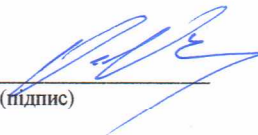
(Курилюк В.В.)  
(прізвище та ініціали)

Протокол № 12 від «22» травня 2025 р.

Схвалено науково-методичною комісією фізичного факультету

Протокол від «23» травня 2025 року № 10

Голова науково-методичної комісії

  
(підпис)

(Оліх О.Я.)  
(прізвище та ініціали)

## ВСТУП

**1. Мета дисципліни** – отримання знань з основ лінійної та нелінійної термодинаміки нерівноважних необоротних процесів та їх застосування для розв'язку практичних задач, пов'язаних з нестационарними, нерівноважними потоками речовини, енергії та заряду у відкритих фізичних системах.

## 2. Попередні вимоги до опанування або вибору навчальної дисципліни:

1. Знати основні поняття курсів «Математичний аналіз», «Аналітична геометрія та лінійна алгебра», «Тензорне та векторне числення», «Диференціальні рівняння», «Математична фізика», «ТФКЗ», «Класична Механіка», «Термодинаміка», «Статистична фізика та термодинаміка».
2. Вміти послідовно формулювати основні положення і закони молекулярної фізики та термодинаміки; застосовувати основні закони збереження механічних величин; вільно володіти поняттями та методами основних математичних дисциплін і застосовувати їх до розв'язання фізичних проблем.
3. Володіти елементарними навичками пошуку та аналізу інформації, опрацювання спеціалізованої літератури, побудови алгебраїчних та диференціальних рівнянь, їх розв'язання та аналізу розв'язку з фізичної точки зору.

## 3. Анотація навчальної дисципліни / референс:

Дисципліна «Фізика нерівноважних відкритих систем» для студентів фізичного факультету освітньої програми «Фізика наносистем» є обов'язковою компонентою. Викладається у II семестрі магістратури в обсязі 3 кредитів, в тому числі 29 годин лекцій. Закінчується заліком. Предмет дисципліни «Фізика нерівноважних відкритих систем» – це закони збереження маси, енергії та імпульсу, рівняння балансу ентропії, лінійні та нелінійні співвідношення між термодинамічними силами та потоками, процеси самоорганізації у відкритих нерівноважних системах.

**4. Завдання (навчальні цілі)** – оволодіння основними методами і принципами нерівноважної термодинаміки необоротних процесів у відкритих фізичних системах необхідними в майбутній практичній діяльності фахівця.

Згідно вимог Стандарту вищої освіти України (другий (магістерський) рівень вищої освіти, галузь знань Е Природничі науки, математика та статистика, спеціальність Е5 «Фізика та астрономія») дисципліна забезпечує набуття здобувачами освіти наступних **компетентностей**:

### *Загальних:*

ЗК01. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК02. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.

### *Фахових (спеціальності):*

ФК01. Здатність використовувати закони та принципи фізики у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.

ФК05. Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.

**5 Результати навчання за дисципліною:** (описуються з детальною достовірністю для розробки заходів оцінювання)

| Результат навчання<br>(1. знати; 2. вміти; 3. комунікація; 4. автономність та відповідальність) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Методи викладання і навчання | Методи оцінювання                                                                           | Відсоток у підсумковій оцінці з дисципліни |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Код                                                                                             | Результат навчання                                                                                                                                                                                                                                                                             |                              |                                                                                             |                                            |
| 1.1                                                                                             | Студент повинен знати:<br>Основні поняття та визначення термодинаміки;<br>особливості перебігу термодинамічних процесів у відкритих системах, що перебувають у станах близькому та далекому від термодинамічної рівноваги;<br>умови утворення дисипативних структур та приклади таких структур | Лекції, самостійна робота    | Контрольні роботи, залік                                                                    | 40                                         |
| 2.1                                                                                             | Студент повинен вміти:<br>Визначати термодинамічні потоки та сили, їх зв'язок з ентропією системи, на основі цього визначати стан системи, визначати стійкість станів термодинамічної системи.<br>Самостійно працювати з відповідною літературою з нерівноважної термодинаміки                 | Лекції, самостійна робота    | Контрольні роботи, залік                                                                    | 40                                         |
| 3.1                                                                                             | Демонструвати обізнаність у сучасних уявленнях та перспективах розвитку нерівноважної термодинаміки відкритих фізичних систем як галузі фізики, що розвивається                                                                                                                                | Лекції, самостійна робота    | Опитування в процесі лекції, доповіді, перевірка рефератів та інших форм самостійної роботи | 20                                         |

**6 Співвідношення результатів навчання дисципліни із програмними результатами навчання** (необов'язково для вибіркових дисциплін)

| Результати навчання дисципліни                                                                                                                                                                                                 | 1.1 | 2.1 | 3.1 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|
| <b>Програмні результати навчання</b>                                                                                                                                                                                           |     |     |     |
| ПРН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики для розв'язання складних задач і практичних проблем. | +   |     |     |
| ПРН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних явищ, об'єктів і процесів.                                                                                                                      |     | +   |     |
| ПРН06. Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та інновацій в області фізики.                                                                            | +   | +   |     |
| ПРН09. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи з колегами.                                                               |     | +   | +   |

|                                                                                                                               |   |   |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|--|
| ПРН11. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач. | + | + |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|--|

## 7. Схема формування оцінки.

### 7.1 Форми оцінювання студентів:

**Система контролю знань та умови складання заліку.** Навчальна дисципліна «Фізика нерівноважних відкритих систем» оцінюється за **модульно-рейтинговою системою**. Вона складається з **2 модулів**. Результати навчальної діяльності студентів оцінюються за **100 - бальною шкалою**.

### 7.2 Організація оцінювання:

**Форми поточного контролю:** оцінювання результатів виконання домашніх самостійних завдань та усні відповіді під час лекцій, контрольні роботи. Максимальна кількість балів, яку студент може отримати в одному модулі, дорівнює **40 балам**.

**Підсумковий модульний контроль знань** студента проводиться у формі **заліку**, під час якого може бути отримана максимальна кількість балів – **20 балів**.

**Підсумкова семестрова рейтингова оцінка** складається з семестрової модульної та залікової оцінок і дорівнює **100 балам**. Студент допускається до складання заліку за наявності мінімум **40 модульних балів** за семестр. У випадку нестачі балів студент має змогу під час складання заліку доотримати бали за відповіді на додаткові питання з контрольних робіт.

### 7.3 Шкала відповідності оцінок

| За 100 – бальною шкалою | За національною шкалою |
|-------------------------|------------------------|
| 60 - 100                | зараховано             |
| 1 – 59                  | не зараховано          |

## 8. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

### ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙ

| №<br>п/п | Назва<br>теми                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Кількість годин |                                        |                      |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------|
|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | лекції          | семінари/<br>практичні/<br>лабораторні | самостійна<br>робота |
| 1        | <b>Тема 1.</b> Вступ. Зв'язок нерівноважної термодинаміки та інших розділів фізики. Рівноважна і нерівноважна термодинаміка. Зв'язок нерівноважної термодинаміки з іншими розділами фізики, зокрема, оптики, молекулярної фізики, фізичної хімії та фізики наносистем.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Термодинамічні потенціали, умови екстремумів в термодинаміці.                                                                                                      | 2               |                                        | 4                    |
|          | <b>Тема 2.</b> Ізольовані, відкриті та закриті системи.. Збереження маси та енергії в закритих та відкритих системах. Зростання ентропії в закритих та відкритих системах.<br>Завдання для самостійної роботи<br>Вивчення матеріалу лекції.<br>Стійкість та флуктуації, засновані на виробництві ентропії.                                                                                                                                                                                                          | 2               |                                        | 4                    |
| 3        | <b>Тема 3.</b> Необоротні термодинамічні процеси. Процеси теплопередачі, адіабатичного розширення, дифузії, хімічні реакції. Термодинамічні потоки та сили. Сили у випадку хімічних реакцій, потоку градієнта температури, концентрації, хімічного потенціалу, напруженості електричного поля.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Необоротні процеси в поляризованому середовищі.                                                                                            | 2               |                                        | 4                    |
| 4        | <b>Тема 4.</b> Принципи лінійної нерівноважної термодинаміки. Наближення локальної термодинамічної рівноваги. Теорія Онзагера. Принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів. Співвідношення Онзагера.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Принцип детальної рівноваги. Співвідношення Онзагера для багатокомпонентної дифузії.                                                                                                                                                    | 2               |                                        | 4                    |
| 5        | <b>Тема 5.</b> Прямі та перехресні необоротні процеси. Термоелектричні явища: ефекти Пельтьє та Зеебека. Електрокінетичні явища: електрофорез, електроосмос, ефект Квінке та ефект Дорна. Термодифузія: ефекти Людвіга-Соре (термодифузія) та Дюфура (дифузійний термоэффект). Практичне використання явища термофорезу.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Термомеханічний та механокалоричний ефекти. Приклад прояву явищ та їх застосування (термоосмос, ефект Кнудсена). | 4               |                                        | 10                   |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |           |  |           |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--|-----------|
| 6  | <b>Тема 6.</b> Стаціонарні стани. Виробництво ентропії та дисипація енергії у відкритій системі. Теорема про мінімум виробництва ентропії. Стійкість стаціонарного стану.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Теорія Ляпунова.                                                                                                                                          | 2         |  | 6         |
|    | Контрольна робота 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1         |  |           |
| 7  | <b>Тема 7.</b> Нелінійна термодинаміка. Системи, що знаходяться у стані, далекому від термодинамічної рівноваги. Стійкі та нестійкі нерівноважні стани. Загальні принципи виробництва ентропії. Лінійний аналіз стійкості нерівноважних стаціонарних станів.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>Діаграма стійкості.                                                       | 2         |  | 4         |
| 8  | <b>Тема 8.</b> Дисипативні структури у сильно нерівноважних системах. Умови виникнення дисипативних структур. Порядок через флуктуації. Втрата стійкості, біфуркації та порушення симетрії. Самоорганізація.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Синергетика.                                                                                                           | 4         |  | 8         |
| 9  | <b>Тема 9.</b> Основні типи дисипативних структур у відкритих системах, далеких від стану термодинамічної рівноваги: просторово-неоднорідні структури, періодичні в часі структури, просторово-часові періодичні структури та бістабільні структури. Приклади.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Теорія катастроф.                                                    | 3         |  | 8         |
| 10 | <b>Тема 10.</b> Особливості формування наноматеріалів у відкритих системах. Консервативна та дисипативна самоорганізація. Самоорганізація у відкритих системах та формування структур в нерівноважних умовах. Приклади самоорганізації в конденсованому середовищі.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Самоорганізація дисипативних структур при пластичній деформації | 2         |  | 5         |
| 11 | <b>Тема 11.</b> Фрактальні структури. Моделі росту фрактального кластера. Використання фрактального підходу до опису структури та властивостей пористих наноматеріалів.<br>Завдання для самостійної роботи<br>1. Вивчення матеріалу лекції.<br>2. Явища самоорганізації в хімії та біології.                                                                                                                  | 2         |  | 4         |
|    | Контрольна робота 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1         |  |           |
|    | <b>ВСЬОГО</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>29</b> |  | <b>61</b> |

**Загальний обсяг 90 год., в тому числі:**

Лекцій – **29 год.**

Семінари – **0 год.**

Практичні заняття – **0 год.**

Лабораторні заняття – **0 год.**

Консультації – **0 год.**

Самостійна робота – **61 год.**

## 9. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА:

### *Основна:*

*(Базова)*

1. D. Kondepudi, I. Prigogine. Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures. John Wiley & Sons, 2014.
2. G. Nikolis, I. Prigogine. Self-organization in nonequilibrium systems. From dissipative structures to order through fluctuations. New York: Wiley, 1977.
3. I. Prigogine. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes (Second ed.). New York, 1961.
4. S.R. de Groot, P. Mazur. Non-equilibrium Thermodynamics: By SR de Groot and P. Mazur. North-Holland Publishing Company, 1962.
5. В. Шевченко, В. Курилюк. Фізика наноструктурних матеріалів, 2025 [бібліотека кафедри].
6. Л.А. Булавін, Д.А. Гаврюшенко, В.М. Сисоєв. Нерівноважна термодинаміка. К.: ВЦ Київський університет, 2003 [бібліотека факультету].

### *Додаткова:*

1. Д.А. Гаврюшенко, Л.А. Булавін, В.М. Сисоєв. Термодинаміка. Навч. посібник для студентів фізичного факультету. Київ: Київський університет, 2004 [бібліотека факультету].
2. G. Nikolis, I. Prigogine. Exploring Complexity: An Introduction. New York: W H Freeman & Company. 1989.
3. R. Haase, Thermodynamics of Irreversible Processes, Dover, 1990.
4. В.Й. Сугаков. Основи синергетики. Київ: Обереги, 2001.
5. Анісімов І. О. Синергетика. Київ: Київський університет, 2014.
6. J. Feder, Fractals. Springer New York. 1988. 284 p.