



# НЕРІВНОВАЖНА ТЕРМОДИНАМІКА

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

|                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рівень вищої освіти                         | <i>Другий (магістерський)</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Галузь знань                                | <i>Е Природничі науки, математика та статистика</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Спеціальність                               | <i>Е5 Фізика і астрономія</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Освітня програма                            | <i>Освітньо-професійна програма «Моделювання фізичних процесів»</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Статус дисципліни                           | <i>Вибіркова</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Форма навчання                              | <i>очна(денна)/дистанційна/змішана</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Рік підготовки, семестр                     | <i>1 курс, весняний семестр</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Обсяг дисципліни                            | <i>4 кредити (120 годин)</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Семестровий контроль/ контрольні заходи     | <i>Залік/МКР/ДКР</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Розклад занять                              | <i>Розклад занять викладено на сторінці <a href="http://roz.kpi.ua/">http://roz.kpi.ua/</a></i>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Мова викладання                             | <i>Українська</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Інформація про керівника курсу / викладачів | <i>Лектор: доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Оксана Юріївна, листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни<br/>Практичні заняття: доктор фізико-математичних наук, професор Горобець Оксана Юріївна, листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни</i> |
| Розміщення курсу                            | <i>На платформі дистанційного навчання Google Клас за посиланням <a href="https://classroom.google.com/c/NzEwMjAxMTYxNDM2?cjc=vaarn4y">https://classroom.google.com/c/NzEwMjAxMTYxNDM2?cjc=vaarn4y</a>, код курсу vaarn4y, постійне посилання на Google Meet <a href="https://meet.google.com/yqu-zjpr-ntn">https://meet.google.com/yqu-zjpr-ntn</a></i>                        |

### Програма навчальної дисципліни

#### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

*Метою навчальної дисципліни є формування у студентів наступних компетентностей.*

##### **Загальні компетентності:**

- ЗК1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.*
- ЗК2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.*
- ЗК3. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.*
- ЗК4. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.*
- ЗК6. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми.*
- ЗК7. Здатність проведення досліджень на відповідному рівні.*

##### **Фахові компетентності спеціальності:**

- ФК1. Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ.*
- ФК2. Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики та/або астрономії.*

ФК5. Здатність сприймати ново здобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними.

ФК9. Здатність самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.

Основні завдання кредитного модуля:

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни студенти після засвоєння кредитного модуля мають продемонструвати наступні **результати навчання**:

ПРН01. Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем.

ПРН02. Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень.

ПРН05. Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів.

ПРН09. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи спілкуючись із колегами.

ПРН10. Відшуковувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела.

ПРН11. Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач.

ПРН13. Створювати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі природних об'єктів та явищ, перевіряти їх адекватність, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи, аналізувати обмеження.

ПРН15. Планувати наукові дослідження з урахуванням цілей та обмежень, обирати ефективні методи дослідження, робити обґрунтовані висновки за результатами дослідження.

ПРН16. Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та/або теоретичних досліджень в області фізики та астрономії.

ПРН18. Вміти використовувати набуті знання для розв'язання різних задач з фізики та астрономії.

ПРН19. Вміти моделювати фізичні і не тільки процеси та явища, що виникають в навколишньому світі.

ПРН20. Вміти створювати та досліджувати різні фізичні теорії за допомогою моделювання фізичних та астрономічних процесів.

## **2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Кредитний модуль «Нерівноважна термодинаміка» відноситься до дисципліни «Нерівноважна термодинаміка», яка належить до циклу дисциплін професійної та практичної підготовки, і вивчається студентами в 2-му семестрі навчання за напрямом «фізика». Цей кредитний модуль спрямований на формування у студентів базових понять, вмінь та навичок стосовно курсу Нерівноважної термодинаміки. Вивчення даного кредитного модуля базується на курсах «Механіка», «Молекулярна фізика», «Електрика та магнетизм», «Класична механіка», «Математичний аналіз» та ін. Знання, отримані студентами з курсу електродинаміки, використовуються в курсах «Вступ до фізики твердого тіла», «Основи квантової теорії поля» та ін.

### 3. Зміст навчальної дисципліни

| Назви розділів, тем                                                                                                                              | Розподіл за семестрами та видами занять |          |                   |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|-------------------|-----------|
|                                                                                                                                                  | Всього                                  | Лекції   | Практичні заняття | СРС       |
| <b>Семестр 2</b>                                                                                                                                 |                                         |          |                   |           |
| <b>Розділ 1. Вихідні положення нерівноважної термодинаміки. Явища переносу.</b>                                                                  |                                         |          |                   |           |
| Тема 1.1. Локальна рівновага і основне рівняння термодинаміки нерівноважних процесів.                                                            | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.2. Функція розподілу нерівноважного макростану. Властивості функцій дисипації.                                                            | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.3. Способи обчислення термодинамічних сил.                                                                                                | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.4. Рівноважні співвідношення під час відсутності і при наявності зовнішніх полів, отримані з виразу для термодинамічних сил.              | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.5. Рівняння балансу і закони збереження різних величин.                                                                                   | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.6. Закон збереження маси. Загальне рівняння дифузії. Внесок наявності хімічних реакцій в рівняння дифузії.                                | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.7. Закон збереження імпульсу.                                                                                                             | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.8. Рівняння балансу для механічної енергії. Закон збереження енергії.                                                                     | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.9. Загальне рівняння теплопровідності.                                                                                                    | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| Тема 1.10. Поняття, визначення і основні постулати лінійної термодинаміки нерівноважних процесів.                                                | 1,75                                    | 0,5      | 0,25              | 1         |
| <b>Разом за розділом 1</b>                                                                                                                       | <b>17,5</b>                             | <b>5</b> | <b>2,5</b>        | <b>10</b> |
| <b>Розділ 2. Виробництво ентропії в нерівноважних системах.</b>                                                                                  |                                         |          |                   |           |
| Тема 2.1. Ентропія у відкритих системах.                                                                                                         | 2,5                                     | 1        | 0,5               | 1         |
| Тема 2.2. Узагальнення другого початку термодинаміки на відкриті системи. Диференціальні характеристики ентропії. Рівняння балансу для ентропії. | 2,5                                     | 1        | 0,5               | 1         |
| Тема 2.3. Поняття локальної рівноваги. Локальне виробництво ентропії.                                                                            | 2,5                                     | 1        | 0,5               | 1         |
| Тема 2.4. Формула Гіббса для ентропії. Локальне виробництво ентропії при протіканні хімічної реакції.                                            | 2,5                                     | 1        | 0,5               | 1         |

|                                                                                                                                                              |      |   |      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---|------|----|
| Тема 2.5. Густина виробництва ентропії в системах із локальною рівновагою.                                                                                   | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 2.6. Принцип мінімуму виробництва ентропії в процесах самоорганізації.                                                                                  | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 2.7. Стаціонарні стани й термодинамічна гілка.                                                                                                          | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 2.8. Надлишкове виробництво ентропії при перетворенні однієї пари речовин в іншу пару речовин.                                                          | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 2.9. Надлишкове виробництво ентропії для реакції автокаталітичного типу.                                                                                | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Разом за розділом 2                                                                                                                                          | 22,5 | 9 | 4,5  | 9  |
| Розділ 3. Лінійна нерівноважна термодинаміка.                                                                                                                |      |   |      |    |
| Тема 3.1. Виробництво ентропії при малих відхиленнях від термодинамічної рівноваги.                                                                          | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 3.2. Нерівноважні стаціонарні стани. Теорема Пригожина.                                                                                                 | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 3.3. Співвідношення взаємності Онзагера і принцип Кюрі.                                                                                                 | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 3.4. Варіаційні принципи термодинаміки незворотних процесів.                                                                                            | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 3.5. Стійкість стаціонарних станів, принцип Ле Шательє і неможливість упорядкування в області лінійних необоротних процесів.                            | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 3.6. Термоелектричні явища. Рівняння для термоелектричних явищ. Ефекти Зеєбека, Пельтьє, Томсона. Термопара. Термомеханічний і механокалоричний ефекти. | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Разом за розділом 3                                                                                                                                          | 15   | 6 | 3    | 6  |
| Тестування виконання СРС з розділів 1-3                                                                                                                      | 9    |   |      | 9  |
| Розділ 4. Нелінійна термодинаміка.                                                                                                                           |      |   |      |    |
| Тема 4.1. Універсальний критерій еволюції Гленсдорфа-Пригожина. Просторові дисипативні структури. Комірки Бенара.                                            | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 4.2. Часові і просторово-часові структури. Реакція Білоусова-Жаботинського.                                                                             | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 4.3. Самоорганізація та еволюція термодинамічно нерівноважних систем.                                                                                   | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Тема 4.4. Стійкість стаціонарних станів систем, далеких від термодинамічної рівноваги.                                                                       | 2,5  | 1 | 0,5  | 1  |
| Разом за розділом 4                                                                                                                                          | 10   | 4 | 2    | 4  |
| Розділ 5. Фізична кінетика.                                                                                                                                  |      |   |      |    |
| Тема 5.1. Броунівський рух.                                                                                                                                  | 3,5  | 1 | 0,5  | 2  |
| Тема 5.2. Рівняння Фокера-Планка.                                                                                                                            | 2,25 | 1 | 0,25 | 1  |
| Тема 5.3. Кінетичні рівняння.                                                                                                                                | 4,5  | 2 | 0,5  | 2  |
| Тема 5.4. Гідродинамічна стадія еволюції нерівноважної системи.                                                                                              | 3,25 | 1 | 0,25 | 2  |
| Тема 5.5. Чисельні методи в статистичній фізиці.                                                                                                             | 13,5 | 1 | 0,5  | 12 |

|                                  |     |    |    |    |
|----------------------------------|-----|----|----|----|
| Разом за розділом 5              | 27  | 6  | 2  | 19 |
| Тестування. Підготовка до заліку | 19  |    |    | 19 |
| Разом                            | 120 | 30 | 14 | 76 |

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

Основна [1-6]

Додаткова [7-13]

- Rodrigues, F. L. S., Lutz, E. Nonequilibrium thermodynamics of quantum coherence beyond linear response. *Communications Physics*. 2024. Vol. 7, No. 1. C. 61.
- Jona-Lasinio, G. Review article: Large fluctuations in non-equilibrium physics. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2023. Vol. 30, No. 2. C. 253–262.
- Sheng, J., Yang, C., Wu, H. Nonequilibrium thermodynamics in cavity optomechanics. *Fundamental Research*. 2023. Vol. 3, No. 1. C. 75–86.
- Aguilera, M., Igarashi, M., Shimazaki, H. Nonequilibrium thermodynamics of the asymmetric Sherrington-Kirkpatrick model. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14, No. 1. C. 3685.
- Liu, Z.-K. Quantitative predictive theories through integrating quantum, statistical, equilibrium, and nonequilibrium thermodynamics. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2024. Vol. 36, No. 34. C. 343003.
- Горобець, О. Ю., Горобець, С. В., Хахно, К. Ю. Мова python для інженерних та наукових задач [Електронний ресурс]: підруч. для здобувачів ступеня бакалавра та магістра за спеціальностями 162 «Біотехнології та біоінженерія» та 104 «Фізика та астрономія»: Київ: КПІ ім. Ізгоря Сікорського, 2024. 277с.
- Demirel, Y. Nonequilibrium thermodynamics: Transport and rate processes in physical, chemical and biological systems: Nonequilibrium Thermodynamics: Transport and Rate Processes in Physical, Chemical and Biological Systems: Third Edition. 2014.
- Bellac, M. Le, Mortessagne, F., Batrouni, G. G. Equilibrium and Non-Equilibrium Statistical Thermodynamics: Equilibrium and Non-Equilibrium Statistical Thermodynamics. 2004.
- Kurzynski, M. Thermodynamic Machinery of Life. *Thermodynamic Machinery of Life*. 2006.
- Анісімов, І. О. Синергетика: Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2013. 283с.
- Булавін, Л. А., Гаврюшенко, Д. А., Сисоєв, В. М. Нерівноважна термодинаміка: Київ: Київський університет імені Тараса Шевченка, 2014. 31с.
- Волчанський, О. В., Гур'євська, О. М., Подопрігора, Н. В. Термодинаміка і статистична фізика: навчальний посібник: [для студ. ф.-м. фак. вищ. пед. навч. закл.]: Кіровоград: ТОВ «Сабоніт», 2012. 431с.
- Мороз, І. О., Завражна, О. М. Основи статистичної термодинаміки та елементи нанотермодинаміки: Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 240с.

#### Навчальний контент

#### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

##### Лекційні заняття

| №  | Назва теми лекції та перелік основних питань<br>(перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)                                            |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Лекція 1.<br>Розділ 1. Вихідні положення нерівноважної термодинаміки. Явища переносу.<br>Тема 1.1. Локальна рівновага і основне рівняння термодинаміки нерівноважних |



|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | процесів. Тема 1.2. Функція розподілу нерівноважного макростану. Властивості функцій дисипації. Тема 1.3. Способи обчислення термодинамічних сил.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 2.  | Лекція 2.<br>Тема 1.4. Рівноважні співвідношення під час відсутності і при наявності зовнішніх полів, отримані з виразу для термодинамічних сил. Тема 1.5. Рівняння балансу і закони збереження різних величин.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                                                                         |
| 3.  | Лекція 3.<br>Тема 1.6. Закон збереження маси. Загальне рівняння дифузії. Внесок наявності хімічних реакцій в рівняння дифузії. Тема 1.7. Закон збереження імпульсу.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 4.  | Лекція .<br>Тема 1.8. Рівняння балансу для механічної енергії. Закон збереження енергії. Тема 1.9. Загальне рівняння теплопровідності.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 5.  | Лекція 5.<br>Тема 1.10. Поняття, визначення і основні постулати лінійної термодинаміки нерівноважних процесів. Розділ 2. Виробництво ентропії в нерівноважних системах. Тема 2.1. Ентропія у відкритих системах. Тема 2.2. Узагальнення другого початку термодинаміки на відкриті системи. Диференціальні характеристики ентропії. Рівняння балансу для ентропії. Тема 2.3. Поняття локальної рівноваги. Локальне виробництво ентропії.<br>[1-6], [7-13] |
| 6.  | Лекція 6.<br>Тема 2.4. Формула Гіббса для ентропії. Локальне виробництво ентропії при протіканні хімічної реакції. Тема 2.5. Густина виробництва ентропії в системах із локальною рівновагою. Тема 2.6. Принцип мінімуму виробництва ентропії в процесах самоорганізації. Тема 2.7. Стаціонарні стани й термодинамічна гілка.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                           |
| 7.  | Лекція 7.<br>Тема 2.8. Надлишкове виробництво ентропії при перетворенні однієї пари речовин в іншу пару речовин. Тема 2.9. Надлишкове виробництво ентропії для реакції автокаталітичного типу.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                                                                                          |
| 8.  | Лекція 8.<br>Розділ 3. Лінійна нерівноважна термодинаміка. Тема 3.1. Виробництво ентропії при малих відхиленнях від термодинамічної рівноваги. Тема 3.2. Нерівноважні стаціонарні стани. Теорема Пригожина.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                                                                             |
| 9.  | Лекція 9.<br>Тема 3.3. Співвідношення взаємності Онзагера і принцип Кюрі. Тема 3.4. Варіаційні принципи термодинаміки незворотних процесів.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 10. | Лекція 10.<br>Тема 3.5. Стійкість стаціонарних станів, принцип Ле Шательє і неможливість упорядкування в області лінійних необоротних процесів. Тема 3.6. Термоелектричні явища. Рівняння для термоелектричних явищ. Ефекти Зеєбека, Пельтьє, Томсона. Термопара. Термомеханічний і механокалоричний ефекти.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                            |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 11. | Лекція 11.<br>Розділ 4. Нелінійна термодинаміка. Тема 4.1. Універсальний критерій еволюції Гленсдорфа- Пригожина. Просторові дисипативні структури. Осередки Бенара. Тема 4.2. Часові і просторово-часові структури. Реакція Білоусова-Жаботинського.<br>[1-6], [7-13] |
| 12. | Лекція 12.<br>Тема 4.3. Самоорганізація та еволюція термодинамічно нерівноважних систем. Тема 4.4. Стійкість стаціонарних станів систем, далеких від термодинамічної рівноваги.<br>[1-6], [7-13]                                                                       |
| 13. | Лекція 13.<br>Розділ 5. Фізична кінетика. Тема 5.1. Броунівський рух.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                                 |
| 14. | Лекція 14.<br>Тема 5.1. Броунівський рух. Тема 5.2. Рівняння Фокера-Планка.<br>[1-6], [7-13]                                                                                                                                                                           |
| 15. | Лекція 15.<br>Тема 5.3. Кінетичні рівняння. Тема 5.4. Гідродинамічна стадія еволюції нерівноважної системи. Тема 5.5. Чисельні методи в статистичній фізиці.<br>[1-6], [7-13]                                                                                          |

## 6. Практичні заняття

| №  | Назва теми лекції та перелік основних питань<br>(перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Практичне заняття 1.<br>Розділ 1. Вихідні положення нерівноважної термодинаміки. Явища переносу. Тема 1.1. Локальна рівновага і основне рівняння термодинаміки нерівноважних процесів. Тема 1.2. Функція розподілу нерівноважного макростану. Властивості функцій дисипації. Тема 1.3. Способи обчислення термодинамічних сил.<br>[7-13]                                                    |
| 2. | Практичне заняття 2.<br>Тема 1.4. Рівноважні співвідношення під час відсутності і при наявності зовнішніх полів, отримані з виразу для термодинамічних сил. Тема 1.5. Рівняння балансу і закони збереження різних величин. Тема 1.6. Закон збереження маси. Загальне рівняння дифузії. Внесок наявності хімічних реакцій в рівняння дифузії. Тема 1.7. Закон збереження імпульсу.<br>[7-13] |
| 3. | Практичне заняття 3.<br>Тема 1.8. Рівняння балансу для механічної енергії. Закон збереження енергії. Тема 1.9. Загальне рівняння теплопровідності. Тема 1.10. Поняття, визначення і основні постулати лінійної термодинаміки нерівноважних процесів. Розділ 2. Виробництво ентропії в нерівноважних системах. Тема 2.1. Ентропія у відкритих системах.<br>[7-13]                            |
| 4. | Практичне заняття 4.<br>Тема 2.2. Узагальнення другого початку термодинаміки на відкриті системи. Диференціальні характеристики ентропії. Рівняння балансу для ентропії. Тема 2.3. Поняття локальної рівноваги. Локальне виробництво ентропії. Тема 2.4. Формула Гіббса для ентропії. Локальне виробництво ентропії при                                                                     |

|    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | <p>протіканні хімічної реакції. Тема 2.5. Густина виробництва ентропії в системах із локальною рівновагою.</p> <p>[7-13]</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 5. | <p>Практичне заняття 5.</p> <p>Тема 2.6. Принцип мінімуму виробництва ентропії в процесах самоорганізації. Тема 2.7. Стаціонарні стани й термодинамічна гілка. Тема 2.8. Надлишкове виробництво ентропії при перетворенні однієї пари речовин в іншу пару речовин. Тема 2.9. Надлишкове виробництво ентропії для реакції автокаталітичного типу.</p> <p>Розділ 3. Лінійна нерівноважна термодинаміка. Тема 3.1. Виробництво ентропії при малих відхиленнях від термодинамічної рівноваги. Тема 3.2. Нерівноважні стаціонарні стани. Теорема Пригожина. Тема 3.3. Співвідношення взаємності Онзагера і принцип Кюрі. Тема 3.4. Варіаційні принципи термодинаміки незворотних процесів.</p> <p>[7-13]</p> |
| 6. | <p>Практичне заняття 6.</p> <p>Тема 3.5. Стійкість стаціонарних станів, принцип Ле Шательє і неможливість упорядкування в області лінійних необоротних процесів.</p> <p>Тема 3.6. Термоелектричні явища. Рівняння для термоелектричних явищ. Ефекти Зеебека, Пельтьє, Томсона. Термопара. Термомеханічний і механокалоричний ефекти. Розділ 4. Нелінійна термодинаміка. Тема 4.1. Універсальний критерій еволюції Гленсдорфа- Пригожина. Просторові дисипативні структури. Осередки Бенара. Тема 4.2. Часові і просторово-часові структури. Реакція Білоусова-Жаботинського.</p> <p>[7-13]</p>                                                                                                          |
| 7. | <p>Практичне заняття 7.</p> <p>Тема 4.3. Самоорганізація та еволюція термодинамічно нерівноважних систем. Тема 4.4. Стійкість стаціонарних станів систем, далеких від термодинамічної рівноваги. Розділ 5. Фізична кінетика. Тема 5.1. Броунівський рух. Тема 5.1. Броунівський рух. Тема 5.2. Рівняння Фокера-Планка. Тема 5.3. Кінетичні рівняння. Тема 5.4. Гідродинамічна стадія еволюції нерівноважної системи. Тема 5.5. Чисельні методи в статистичній фізиці.</p> <p>[7-13]</p>                                                                                                                                                                                                                 |

## 7. Самостійна робота студента

|    | Тема CPC                                                                                                                                                 |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | <p>Розділ 1. Вихідні положення нерівноважної термодинаміки. Явища переносу.</p> <p>[7-13]</p>                                                            |
| 2. | <p>Тема 1.1. Локальна рівновага і основне рівняння термодинаміки нерівноважних процесів.</p> <p>[7-13]</p>                                               |
| 3. | <p>Тема 1.2. Функція розподілу нерівноважного макростану. Властивості функцій дисипації.</p> <p>[7-13]</p>                                               |
| 4. | <p>Тема 1.3. Способи обчислення термодинамічних сил.</p> <p>[7-13]</p>                                                                                   |
| 5. | <p>Тема 1.4. Рівноважні співвідношення під час відсутності і при наявності зовнішніх полів, отримані з виразу для термодинамічних сил.</p> <p>[7-13]</p> |
| 6. | <p>Тема 1.5. Рівняння балансу і закони збереження різних величин.</p>                                                                                    |



|     |                                                                                                                                                            |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | [7-13]                                                                                                                                                     |
| 7.  | Тема 1.6. Закон збереження маси. Загальне рівняння дифузії. Внесок наявності хімічних реакцій в рівняння дифузії.<br>[7-13]                                |
| 8.  | Тема 1.7. Закон збереження імпульсу.<br>[7-13]                                                                                                             |
| 9.  | Тема 1.8. Рівняння балансу для механічної енергії. Закон збереження енергії.<br>[7-13]                                                                     |
| 10. | Тема 1.9. Загальне рівняння теплопровідності.<br>[7-13]                                                                                                    |
| 11. | Тема 1.10. Поняття, визначення і основні постулати лінійної термодинаміки нерівноважних процесів.<br>[7-13]                                                |
| 12. | Розділ 2. Виробництво ентропії в нерівноважних системах.<br>[7-13]                                                                                         |
| 13. | Тема 2.1. Ентропія у відкритих системах.<br>[7-13]                                                                                                         |
| 14. | Тема 2.2. Узагальнення другого початку термодинаміки на відкриті системи. Диференціальні характеристики ентропії. Рівняння балансу для ентропії.<br>[7-13] |
| 15. | Тема 2.3. Поняття локальної рівноваги. Локальне виробництво ентропії.<br>[7-13]                                                                            |
| 16. | Тема 2.4. Формула Гіббса для ентропії. Локальне виробництво ентропії при протіканні хімічної реакції.<br>[7-13]                                            |
| 17. | Тема 2.5. Густина виробництва ентропії в системах із локальною рівновагою.<br>[7-13]                                                                       |
| 18. | Тема 2.6. Принцип мінімуму виробництва ентропії в процесах самоорганізації.<br>[7-13]                                                                      |
| 19. | Тема 2.7. Стаціонарні стани й термодинамічна гілка.<br>[7-13]                                                                                              |
| 20. | Тема 2.8. Надлишкове виробництво ентропії при перетворенні однієї пари речовин в іншу пару речовин.<br>[7-13]                                              |
| 21. | Тема 2.9. Надлишкове виробництво ентропії для реакції автокаталітичного типу.<br>[7-13]                                                                    |
| 22. | Розділ 3. Лінійна нерівноважна термодинаміка.<br>[7-13]                                                                                                    |
| 23. | Тема 3.1. Виробництво ентропії при малих відхиленнях від термодинамічної рівноваги.<br>[7-13]                                                              |
| 24. | Тема 3.2. Нерівноважні стаціонарні стани. Теорема Пригожина.<br>[7-13]                                                                                     |
| 25. | Тема 3.3. Співвідношення взаємності Онзагера і принцип Кюрі.<br>[7-13]                                                                                     |
| 26. | Тема 3.4. Варіаційні принципи термодинаміки незворотних процесів.<br>[7-13]                                                                                |
| 27. | Тема 3.5. Стійкість стаціонарних станів, принцип Ле Шательє і неможливість упорядкування в області лінійних необоротних процесів.<br>[7-13]                |

|     |                                                                                                                                                                        |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 28. | Тема 3.6. Термоелектричні явища. Рівняння для термоелектричних явищ. Ефекти Зеєбека, Пельтьє, Томсона. Термопара. Термомеханічний і механокалоричний ефекти.<br>[7-13] |
| 29. | Тестування виконання СРС з розділів 1-3<br>[7-13]                                                                                                                      |
| 30. | Розділ 4. Нелінійна термодинаміка.<br>[7-13]                                                                                                                           |
| 31. | Тема 4.1. Універсальний критерій еволюції Гленсдорфа- Пригожина. Просторові дисипативні структури. Осередки Бенара.<br>[7-13]                                          |
| 32. | Тема 4.2. Часові і просторово-часові структури. Реакція Білоусова-Жаботинського.<br>[7-13]                                                                             |
| 33. | Тема 4.3. Самоорганізація та еволюція термодинамічно нерівноважних систем.<br>[7-13]                                                                                   |
| 34. | Тема 4.4. Стійкість стаціонарних станів систем, далеких від термодинамічної рівноваги.<br>[7-13]                                                                       |
| 35. | Розділ 5. Фізична кінетика.<br>[7-13]                                                                                                                                  |
| 36. | Тема 5.1. Броунівський рух.<br>[7-13]                                                                                                                                  |
| 37. | Тема 5.2. Рівняння Фокера-Планка.<br>[7-13]                                                                                                                            |
| 38. | Тема 5.3. Кінетичні рівняння.<br>[7-13]                                                                                                                                |
| 39. | Тема 5.4. Гідродинамічна стадія еволюції нерівноважної системи.<br>[7-13]                                                                                              |
| 40. | Тема 5.5. Чисельні методи в статистичній фізиці.<br>[7-13]                                                                                                             |
| 41. | Тестування. Підготовка до заліку<br>[7-13]                                                                                                                             |

## Політика та контроль

### 8. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- правила відвідування занять (згідно розкладу і згідно загально-університетського розпорядку);
- правила поведінки на заняттях (активність на практичних заняттях є обов'язковою, бали за активність на практичних заняттях не ставляться, відключення телефонів є обов'язковим);
- правила захисту індивідуальних завдань (тестування <https://classroom.google.com/c/NzEwMjAxMTYxNDM2?cjc=vaarn4y>);
- правила призначення заохочувальних та штрафних балів (штрафні бали не призначаються, заохочувальні бали призначаються суворо згідно підрозділу 9 цього силабусу);
- політика дедлайнів та перескладань (згідно загально-університетського розпорядку);
- політика щодо академічної доброчесності (згідно загально-університетського розпорядку);

- Студент зобов'язаний зареєструватися на платформі дистанційного навчання Google Workspace for Education Fundamentals (в минулому G Suit For Education) на домені @LLL.kpi.ua та приєднатися до Google Класу «Нерівноважна термодинаміка» за посиланням <https://classroom.google.com/c/NzEwMjAxMTYxNDM2?cjc=vaarn4y>. Для цього студенту необхідно спочатку отримати акаунт в Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua. Для отримання акаунта в Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua необхідно заповнити Google Форму: [https://sikorsky-distance.kpi.ua/req\\_gsuite/](https://sikorsky-distance.kpi.ua/req_gsuite/). Після реєстрації та модерації заявки студента, адміністратор надішле студенту на пошту пароль та логін до акаунту, з яким студент зможе використовувати всі доступні інструменти та сервіси Google Workspace for Education Fundamentals. Google Workspace for Education Fundamentals – це пакет спеціалізованого хмарного програмного забезпечення, інструментів для спільної роботи та дистанційного навчання від компанії Google. Основна складова пакету – система управління навчанням Google Клас, яка дозволяє викладачу створювати навчальні класи, оцінювати завдання, надавати учням зворотній зв'язок, публікувати оголошення і поширювати навчальні матеріали. Викладач може бачити, хто виконав завдання, а хто ще продовжує над ним працювати, а також читати питання і коментарі учнів. Для приєднання до навчального курсу «Нерівноважна термодинаміка» студенту потрібно перейти у Google Клас за посиланням <https://classroom.google.com>, натиснути зображення «+» у верхньому правому кутку браузера, вибрати «Приєднатися до класу» та ввести код курсу vaarn4y. Акаунти студентів, які приєдналися до Google Класу не з акаунта на домені @LLL.kpi.ua, будуть вилучатися з навчального курсу «Нерівноважна термодинаміка» Google Класу тому, що автоматичний імпорт оцінок за тестування можливий виключно з акаунта на домені @LLL.kpi.ua. Система Google Клас автоматично надсилає кожному студенту бали по кожному з видів контролю на електронну пошту. Тому для ознайомлення з балами за кожен окремий вид контролю студенту необхідно змінити налаштування електронної пошти так, щоб ці електронні листи не потрапляли у спам. Всі виконані завдання для перевірки викладачем студент повинен завантажувати через систему Google Клас (результати виконання завдань, надіслані через телеграм канал перевірятися не будуть);
- Листування із студентами з організаційних питань буде здійснюватися через WhatsApp чат дисципліни.

## 9. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

**Поточний контроль:** тести

**Календарний контроль:** контроль виконання самостійної роботи проводиться двічі на семестр у формі тестів як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестрова атестація проводиться у вигляді екзамену. Для оцінювання результатів навчання застосовується 100-бальна рейтингова система і університетська шкала.

Розподіл навчального часу за видами занять і завдань з дисципліни згідно з робочим навчальним планом.

| Семестр | Навчальний час |            | Розподіл навчальних годин |                   |     | Контрольні заходи |
|---------|----------------|------------|---------------------------|-------------------|-----|-------------------|
|         | Кредити        | Акад. год. | Лекції                    | Практичні заняття | СРС | Семестр атест.    |
| 2       | 4              | 120        | 30                        | 14                | 76  | Залік             |

**Поточний контроль:** тести

**Календарний контроль:** контроль виконання самостійної роботи та завдань практичних занять проводиться двічі на семестр у формі тестів як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Рейтинг студентів ФМФ з «Нерівноважної термодинаміки» складається з балів, які вони отримують за:

- 1) МКР
- 2) ДКР
- 3) Практичні заняття
- 4) Додаткові бали за активність на практичних заняттях (10 балів максимум).

Студентам, які успішно здали МКР (модульна контрольна робота) та розв'язують задачі на практичних заняттях, можуть нараховуватися за семестр максимум 100 балів. Оцінювання МКР та оцінювання вміння розв'язувати задачі на практичних заняттях здійснюватиметься оцінюванням результатів тестування на платформі дистанційного навчання Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua в системі Google Клас за посиланням <https://classroom.google.com/c/NzEwMjAxMTYxNDM2?cjc=vaarn4y>. МКР складається з одного тесту 50 балів максимум. Оцінювання вміння розв'язувати задачі на практичних заняттях та ДКР складається з двох тестів по 25 балів максимум за кожен тест. Кожен з тестів можливо пройти тільки один раз. Відповідно перед кожною атестацією, а також в кінці семестру всі набрані студентом бали в Google Класі будуть вноситись до системи АІС «Електронний кампус» КПІ імені Ігоря Сікорського.

Необхідною умовою допуску до заліку із «Нерівноважної термодинаміки» є задовільне виконання МКР (не менше 25 балів), задовільні вміння розв'язання задач на практичних заняттях (не менше 25 балів), а також сумарний стартовий рейтинг не менше 50 балів.

Семестрова атестація проводиться у вигляді заліку. Для оцінювання результатів навчання застосовується 100-бальна рейтингова система і університетська шкала.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання.

Сума вагових балів контрольних заходів зі «Нерівноважної термодинаміки» протягом семестру складає  **$R_c = 100$  балів**.

Рейтингова шкала з «Нерівноважної термодинаміки» складає  **$R_D = R_c = 100$  балів**.

Якщо студент протягом семестру набрав не менше 60 балів, він отримує залік автоматом.

Для виставлення оцінок до залікової книжки рейтинг переводиться у оцінки відповідно до таблиці.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

| Кількість балів                            | Оцінка       |
|--------------------------------------------|--------------|
| 95-100                                     | Відмінно     |
| 85-94                                      | Дуже добре   |
| 75-84                                      | Добре        |
| 65-74                                      | Задовільно   |
| 60-64                                      | Достатньо    |
| Менше 60                                   | Незадовільно |
| Не виконані інші умови допуску до екзамену | Не допущено  |

Якщо ж студент протягом семестру набрав менше 60 балів, він має скласти залікову контрольну роботу у вигляді тесту на платформі дистанційного навчання Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua в системі Google Клас за посиланням <https://classroom.google.com/c/NzEwMjAxMTYxNDM2?cjc=vaarn4y>, ваговий коефіцієнт якої складає 100 балів. При цьому, стартовий рейтинг не враховується. Кількість балів, набраних на заліковій контрольній роботі, переводиться в оцінку за тою ж шкалою. Якщо студент набрав протягом семестру 60 балів і більше, але хоче підвищити свою рейтингову оцінку, він може це зробити шляхом складання залікової контрольної роботи у вигляді тесту на платформі дистанційного навчання Google Workspace for Education Fundamentals на домені @LLL.kpi.ua в системі Google Клас за посиланням <https://classroom.google.com/c/NzEwMjAxMTYxNDM2?cjc=vaarn4y>, ваговий коефіцієнт якої складає 100 балів. При цьому, стартовий рейтинг не враховується.

#### **10. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

- *Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль наведено в тестах в системі дистанційного навчання Google Клас <https://classroom.google.com/c/NzEwMjAxMTYxNDM2?cjc=vaarn4y> ;*
- *можливість зарахування сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за відповідною тематикою не передбачена.*

#### **Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено** професором кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів, д.ф.-м.н., професором Горобець О.Ю.

**Ухвалено** кафедрою загальної фізики та моделювання фізичних процесів (протокол № 1/06-25 від 25.06.2025).

**Погоджено** Методичною комісією Фізико-математичного факультету (протокол № 10 від 27.06.2024).