



## ФІЗИКА НЕРІВНОВАЖНИХ СИСТЕМ

### Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

#### • Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Третій (доктор філософії)</i>
Галузь знань	<i>10 Природничі науки</i>
Спеціальність	<i>105 Прикладна фізика та наноматеріали</i>
Освітня програма	<i>Прикладна фізика</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>120 годин / 4 кредити ECTS лекції – 27; семінарські заняття – 18; СР – 75 год.</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Фізика нерівноважних систем Екзамен</i>
Розклад занять	<a href="http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses">http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses</a>
Мова викладання	<i>Українська/Англійська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>к.ф.-м.н., с.н.с., Дімітрієв Олег Петрович, dimitr@isp.kiev.ua</i> Практичні / Семінарські: <i>к.ф.-м.н., с.н.с., Дімітрієв Олег Петрович, dimitr@isp.kiev.ua</i>
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс (Moodle, мейл групи: )

#### • Програма навчальної дисципліни

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

Нерівноважні процеси у природі настільки ж звичні, як і рівноважні. Обидві процеси не можуть існувати одночасно, бо відбуваються за різними умовами. Але нерівноважні процеси навіть є більш важливі, ніж рівноважні, бо вони є основою життя і рушійною силою переходу до нових станів, в тому числі високоорганізованих. В той час як рівноважні процеси характерні для сталих систем, які припинили свою еволюцію.

Метою курсу «Фізика нерівноважних систем», по-перше, є показати різноманітність нерівноважних процесів – від простих, таких як випаровування рідини або розчинення цукру у воді до утворення складних самоорганізованих структур. По-друге, показати, як за рахунок нерівноважних процесів виникає порядок. Пошуком відповіді на ці питання як раз займається ця дисципліна. Дисципліна складається з двох основних розділів. Перше, це вивчення теоретичних засад дисципліни, а саме, умов виникнення, характеру протікання та визначення термодинамічних властивостей нерівноважних процесів, визначення критеріїв переходу у більш впорядкований стан, положення теорії нерівноважних фазових переходів, поняття аттракторів, автохвиль, стохастичних процесів тощо. Друге, більш детально розглядаються особливості функціонування електронних нерівноважних процесів в напівпровідниках, зокрема, проходження струму, шумів, оптичного поглинання та рекомбінації нерівноважних носіїв заряду, надання студентам поняття нерівноважних систем, встановлення зв'язку між генерацією та релаксацією нерівноважних носіїв заряду та навчання студентів методам експериментальних досліджень нерівноважних систем.

Метою викладання курсу «Фізика нерівноважних систем» є вивчення основних понять фізики нерівноважних систем, термінів та їх визначень, основ теоретичного забезпечення досліджень, методів математичного забезпечення і засобів їх реалізації, принципів побудови фундаментальних моделей, застосованих у фізиці нерівноважних систем, як прикладів використання новітніх досягнень науки і техніки у вивченні вказаної дисципліни. Вивчення

курсу “Фізика нерівноважних систем” необхідне для розвитку у студентів наукової інтуїції, ознайомлення з теоретичними моделями та експериментальними результатами, що були розроблені на протязі останніх років.

В результаті вивчення навчальної дисципліни «Фізика нерівноважних систем» у відповідності до вимог освітньо-професійної програми аспіранти мають оволодіти:

*загальними компетентностями (ЗК):*

ЗК 1 Здатність проводити критичний аналіз, оцінку і синтез нових і складних ідей, переосмислювати наявне та створювати нове цілісне знання та/або професійну практику, розв’язувати значущі наукові та інші проблеми.

ЗК 2 Здатність використовувати у професійній діяльності сучасні знання з різних наук, у тому числі міждисциплінарного характеру.

ЗК 5 Здатність знаходити, обробляти й аналізувати необхідну інформацію для вирішення проблем й прийняття рішень.

ЗК 7 Здатність забезпечувати безперервний саморозвиток і самовдосконалення, відповідальність за розвиток інших.

*фаховими компетентностями (ФК):*

ФК 1 Здатність самостійно здійснювати науково-дослідну та науково-педагогічну діяльність у галузі прикладної фізики з використанням новітніх наукових теорій, методів та інноваційних технологій

ФК 2 Здатність адаптувати і узагальнювати результати сучасних досліджень в галузі прикладної фізики для вирішення наукових і практичних проблем

ФК 3 Здатність проводити теоретичні й експериментальні дослідження, комбінувати та зв’язувати їх методи, інтерпретувати одержані результати з метою виявлення властивостей та характеристик досліджуваних об’єктів в галузі прикладної фізики та нанотехнологій

ФК 4 Здатність проводити дослідження складних систем, їх системний та синергетичний аналіз, використовувати моделі та методи моделювання в наукових дослідженнях.

Після засвоєння навчальної дисципліни аспіранти мають продемонструвати такі *програмні результати навчання (ПРН):*

ПРН 1 Системні знання у фізиці та інших природничих науках, включаючи оволодіння методами наукового дослідження при здійсненні професійної діяльності.

ПРН 2 Системні знання поглибленого рівня в галузі прикладної фізики, наукомістких технологій, нових речовин і матеріалів, методів дослідження їх властивостей, зокрема, знання сучасних досягнень та інноваційних прикладних рішень, в тому числі на стику різних галузей наук.

ПРН 3 Знання методики проведення теоретичних та експериментальних досліджень, основоположних принципів системного та синергетичного аналізу, розуміння моделей та методів моделювання в прикладній фізиці.

ПРН 9 Вміння орієнтуватися в наукових проблемах у професійній сфері, знаходити оптимальні шляхи їх розв’язання.

ПРН 10 Вміння критично аналізувати, оцінювати і синтезувати нові складні ідеї, які заслуговують на рецензовану публікацію на національному або міжнародному рівні.

ПРН 11 Вміння розширення меж і переосмислення наявного теоретичного знання й професійних практик, здатності сприймати, розробляти, застосовувати і адаптувати основний процес дослідження з науковою повнотою і цілісністю.

ПРН 12 Вміння обирати теоретичні й експериментальні методи дослідження, відповідні методи системного і синергетичного аналізу, застосовувати моделі та методи моделювання та інноваційні підходи для розв’язання складних завдань і проблем в науково-дослідній та/або інноваційних сферах.

ПРН 15 Вміння збирати та інтерпретувати наукову та фахову інформацію, з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій та пошукових систем.

ПРН 16 Вміння використовувати сучасні методи і технології професійної комунікації українською та іноземними мовами.

ПРН 17 Вміння ефективно взаємодіяти в професійному середовищі й соціумі в цілому, результативно, науково і професійно працювати над новими ідеями як індивідуально, так і як член творчої команди.

ПРН 18 Вміння формулювати свої професійні висновки, особисті результати і досягнення та розумно їх обґрунтовувати для фахової та не фахової аудиторії.

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

Фізика нерівноважних систем має справу з проблемами, що цілком заслуговують вивчення не тільки в спеціальних курсах, а також в загальному курсі фізики. Матеріал курсу базується на знаннях набутих студентами при вивченні інших дисциплін, зокрема, фізики твердого тіла та термодинаміки і стат. фізики. Вивчення курсу також базується на апеляції до математичних навичок, що набуваються студентами при вивченні математичного аналізу та курсу диференційних рівнянь. При вивченні навчальної програми доцільно враховувати специфіку спеціальності, при цьому необхідним є попереднє вивчення усіх базових понять загальної фізики, зокрема, термодинаміки, фізики твердого тіла, оптики, електрики та магнетизму, а також методів інтегрального та диференціального обчислення.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

### *Розділ 1. Основні положення фізики нерівноважних систем*

#### *Лекція 1.*

Тема 1.1: Умови виникнення нерівноважних станів. Локальна рівновага. Виробництво ентропії. Лінійні закони Онсагера. Співвідношення взаємності. Варіаційні принципи лінійної термодинаміки нерівноважних процесів. Теореми Онсагера і Пригожина.

#### *Лекція 2.*

Тема 1.2: Нерівноважна термодинаміка і синергетика. Принципи самоорганізації. Макроскопічний опис самоорганізації. Мережеві структури.

#### *Лекція 3.*

Тема 1.3: Нерівноважні фазові переходи. Основні положення теорії фазових переходів Ландау. Фазові переходи в просторово неоднорідною системою. Рівняння Гінзбурга-Ландау. Критичні показники. Гіпотеза масштабної інваріантності. Особливості нерівноважних фазових переходів.

Перехід від ламінарної до турбулентної течії як нерівноважний фазовий перехід.

#### *Лекція 4.*

Тема 1.4: Дисипативні динамічні системи. Атрактори. Типи атракторів. Стаціонарні точки. Граничні цикли. Фрактальні структури і фрактальна розмірність. Визначення розмірності атракторів за експериментальними рядами даних. Рівняння Вольтерри-Лоттки.

#### *Лекція 5.*

Тема 1.5: Автохвилі. Типи автохвиль в нелінійних середовищах. Хвилі перемикання в бістабільних середовищах. Приклади хвиль перемикання.

#### *Лекція 6.*

Тема 1.6: Стохастичні процеси. Стохастичні рівняння руху. Броунівський рух. Рівняння Ланжевена. Рівняння Фоккера-Планка. Марківські процеси і основне кінетичне рівняння.

Тема 1.7: Види шумів та їхні спектральні характеристики. Мультиплікативний шум. Фліккер - шум. Нерівноважні фазові переходи, індуковані шумом.

### *Розділ 2. Нерівноважні процеси в напівпровідниках*

#### *Лекція 7.*

Тема 2.1: Процеси збудження та релаксації нерівноважних носіїв заряду. Види безвипромінювальної рекомбінації нерівноважних носіїв заряду: ОЖЕ рекомбінація, рекомбінація на дислокаціях та межі поділу. Види випромінювальної рекомбінації.

### ***Лекція 8.***

Тема 2.3 – Кінетика релаксації нерівноважних носіїв заряду. Кінетика затухання люмінесценції. Час життя носіїв заряду.

Тема 2.4: Перенос вільних носіїв заряду. Дифузійний і дрейфовий струм. Рухливість основних та неосновних носіїв заряду.

Тема 2.5: Перенос енергії. Класифікація зв'язків донора і акцептора енергії. Дифузія екситону.

## **4. Навчальні матеріали та ресурси**

### Основна література:

1. Скіцько, І. Ф. Фізика (Фізика для інженерів) [Електронний ресурс] : підручник для студентів, які навчаються за технічними спеціальностями / І. Ф. Скіцько, О. І. Скіцько; КПІ ім. Ігоря Сікорського; ред.: А. О. Авраменко, 2017. – 513 с.

2. Булавін Л.А., Ключніков О.О., Плевачук Ю.О., Склярчук В.М., Сисоєв В.М. Термодинаміка розплавів. – Інститут проблем безпеки АЕС, 2014, 405с.

3. Боровий М.О., Цареградська Т.Л., Куницький Ю.А., Каленик О. Невпорядковані системи та квазікристали. – ТОВ НВП “Інтерсервіс”, 2014, 228с.

4. Венгер Є.Ф., Грибань В.М., Мельничук О.В. Основи теоретичної фізики. К.: Вища школа, 2011. 430 с.

5. Різак В., Різак,І., Рудавський, Е. Кріогенна фізика і техніка. Наукова думка, 2006. — 512 с.

6. Єрмолаєв О. М., Рашба Г. І. Вступ до статистичної фізики і термодинаміки: Навчальний посібник. – Х.: ХНУ, 2004. – 516 с.

7. Булавін Л.А., Гаврюшенко Д.А., Сисоєв В.М. Основи термодинаміки. Київ, “Київський ун-т”, 2004.-165с.;

8. Булавін Л.А., Гаврюшенко Д.А., Сисоєв В.М. Термодинаміка. Київ-Полтава, “Київський ун-т”, 2004.-152с.;

9. Булавін Л.А., Гаврюшенко Д.А., Сисоєв В.М. Нерівноважна термодинаміка. Ч.2. Київ, “Київ. ун-т”, 2004.-16с.;

10. Булавін Л.А., Вербинська Г.М., Вишневецький В.М. Квазіупруге розсіяння нейтронів в рідинах. Полтава, АСМІ, 2004.-88с.

11. Давидюк Г.Є. Нерівноважні процеси в напівпровідниках: Навч. посібник. / Г.Є. Давидюк – Луцьк: Ред.-вид. «Вежа» Волин. Держ. Ун-ту ім. Лесі Українки, 2000. – 151 с.

12. Федорченко А. М. Теоретична фізика. Т. 2. – Київ: Вища школа, 1993.

13. Кобилянський В. Б. Статистична фізика. – К.: Вища школа, 1972.

### Допоміжна література

14. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов / И. Пригожин. М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1960. 160 с.

15. Де Гроот С. Неравновесная термодинамика / С. Де Гроот, П. Мазур. М.: Мир, 1964. 456 с.

16. Скоков В.Н., Селезнев В.Д. Введение в физику неравновесных процессов. / Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2010. 235 с.

17. Рабинович М.И. Введение в теорию колебаний и волн / М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков. М.: Наука, 1992. 456 с.

18. Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах / В.С. Анищенко. М.: Наука, 1990. 312 с.

19. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы / И. Дьярмати. М.: Мир, 1974. 304 с.

20. Зубарев Д. Н. Неравновесная статистическая термодинамика / Д.Н. Зубарев. М.: Наука, 1971. 415 с.

21. Кайзер Дж. Статистическая термодинамика неравновесных процессов / Дж. Кайзер. М.: Мир, 1990. 608 с.

22. Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика /М.А. Леонтович. М.: Наука, 1983. 416 с.
23. Шелль Э. Самоорганизация в полупроводниках / Э.Шелль. М.: Мир, 1991. 464 с.
24. Хорстхемке В. Индуцированные шумом переходы / В. Хорстхемке, Р. Лефевр. М.: Мир, 1987. 397 с.
25. Эбелинг В., Энгель В., Файстель Р. Физика процессов эволюции/ В. Эбелинг, В. Энгель, Р. Файстель. М.: УРСС, 2001. 326 с.

### ● Навчальний контент

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

*Аспіранти засвоюють матеріал з фізики нерівноважних систем у 3 етапи. Перше, це ознайомлення з матеріалом на лекціях, в ході яких проводиться обговорення проблемних питань. Після лекції матеріал надається в електронному виді для самостійного вивчення. Після кожних 2-х лекцій проводиться практичне заняття, де студенти розв'язують практичні завдання з вивченої теми.*

№ з/п	Тема	Програмні результати навчання	Основні завдання	
			Контрольний захід	Термін виконання
1.	Формулювання постулату про локальну термодинамічну рівновагу та основних наближень лінійної нерівноважної термодинаміки. Вивід формули для виробництва ентропії та її зв'язку з потоками і термодинамічними силами. Розгляд обмежень, що накладаються на значення кінетичних коефіцієнтів, обумовлених другим законом термодинаміки. Співвідношення взаємності Онсагера. Принцип найменшого розсіювання енергії Онсагера і принцип мінімального виробництва ентропії Пригожина.	№ 1, 2, 3	Практична робота №1	2-ий тиждень
2.	Розгляд типів атракторів. Розв'язування рівняння Вольтерри-Лоттки для різних початкових умов.	№ ...	Практична робота №2	4-ий тиждень
3.	Розгляд прикладів нерівноважних фазових переходів та утворення просторових, тимчасових і просторово-часових структур у відкритих нерівноважних системах. Аналіз конкуруючих факторів, які призводять до утворення осередків Бенара.	№ ...	Практична робота №3	6-ий тиждень
4.	КР для простих процесів випадкового блукання. Рівняння Фокера-Планка. Рівняння Ланжевена та його фізичний зміст. Рівняння неперервності і його використання для розрахунку параметрів розподілу нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках. Визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках n- чи p- типу провідності в залежності від положення рівня Фермі.	№ ...	Практична робота №4	8-ий тиждень

#### 6. Самостійна робота аспіранта

*А. Реферування літератури. Приклади статей для самостійного вивчення:*

1. G. Collell, J. Fauquet, Brain activity and cognition: a connection from thermodynamics and information theory. *Frontiers in Psychology*, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2015.00818>.
2. J. M. R. Parrondo, J. M. Horowitz, T. Sagawa, Thermodynamics of information. *Nature physics*, 2015, 11, 131-139.
3. X. Fang, K. Kruse, T. Lu, J. Wang, Nonequilibrium Physics in Biology. - *Reviews of Modern Physics*, 2019, 91, 045004.
4. R. G. Melko, G. Carleo, J. Carrasquilla, J. I. Cirac, Restricted Boltzmann machines in quantum Physics. *Nature Physics* | VOL 15 | SEPTEMBER 2019 | 887–892.
5. E. J. Chaisson, Energy Flows in Low-Entropy Complex Systems. *Entropy* 2015, 17, 8007–8018; doi:10.3390/e17127857.

*Б. Вивід деяких формул з теми:*

1. Побудова кінетичного рівняння. Балансова форма кінетичного рівняння.
2. Вивід рівняння неперервності і його використання для розрахунку параметрів розподілу нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках.
3. Оцініть середній модуль швидкості броунівського руху щепки масою 1 г, яка плаває на поверхні води.
4. Стохастичний спосіб визначення коефіцієнта дифузії.

*В. Підготовка рефератів по окремим темам курсу для поглибленої роботи студентів. Перелік тем рефератів:*

1. Фліккер-шум і його основні властивості.
2. Квазіфазова діаграма.
3. Диссипативні системи.
4. Динамічний хаос та його властивості.
5. Квантова дифузія.

## ● Політика та контроль

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

#### ● Порушення термінів виконання завдань та заохочувальні бали

Заохочувальні бали		Штрафні бали	
Критерій	Ваговий бал	Критерій	Ваговий бал
Заохочувальні бали		Штрафні бали	
Критерій	Ваговий бал	Критерій	Ваговий бал
Конспект лекційних занять <sup>1</sup>	3 бали	Порушення термінів виконання практичних робіт (за кожну таку роботу)	-3 бали
Участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах та/або конкурсах (за тематикою навчальної дисципліни)	10 балів	Порушення академічної доброчесності при виконання практичних робіт (списування один у одного, за кожну таку роботу)	-10 балів

#### ● Відвідування занять

Відвідування лекцій, практичних та лабораторних занять, а також відсутність на них, не оцінюється. Однак, студентам рекомендується відвідувати заняття, оскільки на них викладається теоретичний матеріал та розвиваються навички, необхідні для виконання семестрового індивідуального завдання (ДКР), практичних робіт та тематичних завдань. Система оцінювання орієнтована на отримання балів за активність студента, а також виконання завдань, які здатні розвинути практичні уміння та навички.

#### ● Пропущені контрольні заходи

<sup>1</sup> Мають бути законспектовані всі лекції власноруч, після перевірки конспекту лекційних занять конспект позначається для запобігання його передачі іншим студентам.

Результат модульної контрольної роботи для студента(-ки), який не з'явився на контрольний захід, є нульовим. У такому разі, студент(-ка) має можливість написати модульну контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50% від загальної кількості балів. Повторне написання модульної контрольної роботи не допускається.

Тематичне завдання, яке подається на перевірку з порушенням терміну виконання, не оцінюється.

- **Академічна доброчесність**

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

- **Норми етичної поведінки**

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

- **Процедура оскарження результатів контрольних заходів**

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами.

Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано, пояснивши з яким критерієм не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень.

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

Поточний контроль: експрес-опитування, опитування за темою заняття, МКР, тест тощо

Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестровий контроль: екзамен

Умови допуску до семестрового контролю: мінімально позитивна оцінка за індивідуальне завдання / зарахування усіх лабораторних робіт / семестровий рейтинг більше та дорівнює 30 балів.

### Система оцінювання

№ з/п	Контрольний захід	%	Ваговий бал	Кіл-ть	Всього
1.	Семестрове індивідуальне завдання (реферат)	10	10	1	10
2.	Модульна контрольна робота (МКР)	40	10	4	40
3.	Іспит	50	50	1	50
	Всього				100

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

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

## 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

**Перелік питань, що виносяться на екзамен**

- Формулювання постулату про локальну термодинамічну рівновагу
- Формулювання основних наближень лінійної нерівноважної термодинаміки.
- Вивід формули для виробництва ентропії та її зв'язку з потоками і термодинамічними силами.

- Розгляд обмежень, що накладаються на значення кінетичних коефіцієнтів, обумовлених другим законом термодинаміки.
- Співвідношення взаємності Онсагера.
- Принцип найменшого розсіювання енергії Онсагера
- Принцип мінімального виробництва ентропії Пригожина.
- Розгляд типів атракторів.
- Розв'язування рівняння Вольтерри-Лоттки для різних початкових умов.
- Розгляд прикладів нерівноважних фазових переходів та утворення просторових, тимчасових і просторово-часових структур у відкритих нерівноважних системах.
- Аналіз конкуруючих факторів, які призводять до утворення осередків Бенара.
- КР для простих процесів випадкового блукання.
- Рівняння Фокера-Планка.
- Рівняння Ланжевена та його фізичний зміст.
- Рівняння неперервності і його використання для розрахунку параметрів розподілу нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках.
- Визначення часу життя нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках n- чи p- типу провідності в залежності від положення рівня Фермі.

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

Фізика нерівноважних систем

Складено доцент, к.ф.-м.н., с.н.с., Дімітрієв Олег Петрович

Ухвалено кафедрою прикладної фізики (протокол № 2 від 04 вересня 2020 р.)

Затверджено Вченою радою ФТІ (протокол № 7/1 від 7 вересня 2020 р.)