

Міністерство освіти і науки України  
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника  
Фізико-технічний факультет  
Кафедра матеріалознавства і новітніх технологій

**“ЗАТВЕРДЖУЮ”**

Проректор \_\_\_\_\_

“ 30 ” серпня 2022 р.

## **РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

### **Термодинаміка нерівноважних процесів**

Освітня програма	Прикладна фізика та наноматеріали
Спеціальність	105 Прикладна фізика та наноматеріали
Галузь знань	10 Природничі науки

Івано-Франківськ  
2022

Робоча програма спецкурсу «Термодинаміка нерівноважних процесів»  
для підготовки здобувачів третього рівня вищої освіти – доктора філософії  
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали. “26” серпня 2022 р.

Розробники:

Рачій Богдан Іванович, професор кафедри матеріалознавства і новітніх  
технологій, доктор фізико-математичних наук, старший дослідник.

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри матеріалознавства і новітніх  
технологій

Протокол № 1 від “29” серпня 2022 р.

Завідувач кафедри матеріалознавства і новітніх технологій

“29” серпня 2022 р.

\_\_\_\_\_ Богдан ОСТАФІЙЧУК

Схвалено методичною комісією фізико-технічного факультету.

Протокол від “30” серпня 2022 р. № 1

“30” серпня 2022 р.

Голова

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Михайло ЯЦУРА

(прізвище та ініціали)

© Прикарпатський національний  
університет імені Василя Стефаника,  
2022 рік

## 1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни
		денна форма навчання
Кількість кредитів – 3	Галузь знань 10 Природничі науки	За вибором
Модулів – 1	Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали	<b>Рік підготовки:</b>
Змістових модулів – 2		II
Індивідуальне науково-дослідне завдання – проєкт		<b>Семестр</b>
Загальна кількість годин – 90		3-й
Тижневих годин для денної форми навчання:  аудиторних – 2 самостійної роботи студента – 4	третій освітньо-науковий рівень – <u>доктор філософії</u>	<b>Лекції</b>
		20 год.
		<b>Практичні, семінарські</b>
		10 год.
		<b>Лабораторні</b>
		___ год.
		<b>Самостійна робота</b>
60 год.		
<b>Індивідуальні завдання:</b>		
___ год.		
<b>Вид контролю:</b>		
___ залік ___		

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної і індивідуальної роботи становить:  $30/60=0,5$

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Метою вивчення навчальної дисципліни є ознайомлення здобувачів освіти з сучасним уявленням про термодинаміку нерівноважних процесів та формування на його основі наукового підходу до вирішення практичних завдань, пов'язаних з нестационарними та нерівноважними потоками речовини, енергії і заряду у відкритих фізико-хімічних системах. Основні цілі, що вирішуються в процесі викладання дисципліни, є: отримання знань про сучасні методологічні наукові підходи, що реалізуються в нерівноважній термодинаміці та застосовуються до опису великої кількості фізико-хімічних процесів та явищ у природі, техніці та промисловості; вивчення основних законів та рівнянь нерівноважної термодинаміки та обґрунтування їх використання при вирішенні фундаментальних та прикладних фізичних завдань; формування умінь застосування основних співвідношень термодинаміки незворотних процесів у теорії нерівноважних фазових перетворень та нерівноважного структуроутворення металевих сплавів; набуття навичок щодо використання отриманих знань для встановлення однозначного зв'язку між потоками фізичних величин (маси, енергії, заряду тощо) та зовнішніми силами, що діють на систему, та застосування цих навичок для вирішення прикладних завдань матеріалознавства та технології матеріалів; ознайомлення здобувачів освіти із сучасними досягненнями природничих наук, тісно пов'язаних із нерівноважною термодинамікою: методологіями нелінійної динаміки, детермінованого хаосу, теорії самоорганізації, прикладної синергетики.

У результаті вивчення навчальної дисципліни здобувач освіти повинен:

**знати:** балансові рівняння, що характеризують процеси перенесення маси, імпульсу, енергії, заряду, ентропії тощо; принцип локальної термодинамічної рівноваги, її обґрунтування; закон зростання ентропії внаслідок незворотних процесів, його обґрунтування; основні закони, отримані у межах лінійної термодинаміки незворотних процесів (теорема Кюрі, співвідношення взаємності Онзагера); узагальнені закони процесів перенесення, отримані у межах лінійної теорії; критерії еволюції та стійкості відкритих нерівноважних термодинамічних систем; умови виникнення та існування дисипативних структур;

**уміти:** записувати систему рівнянь, що описує стан нерівноважного суцільного середовища; визначати потоки та сили, що існують у нерівноважних системах, поділяти їх на скалярні, векторні та тензорні; встановлювати зв'язки між потоками та силами; обчислювати виробництво ентропії та дисипації енергії у відкритих системах, аналізувати їх еволюцію; наводити приклади дисипативних структур з областей фізики, хімії, біології, матеріалознавства. Термінологією в області термодинаміки нерівноважних процесів; **володіти:** навичками дискусії з професійної тематики з використанням понять та законів термодинаміки нерівноважних процесів; навичками з самостійного вивчення та розуміння спеціальної, наукової, довідкової та методичної літератури, пов'язаної з проблемами нерівноважної термодинаміки.

### 3. Програма навчальної дисципліни

**Змістовий модуль 1.** Цілі, завдання, склад та призначення курсу. Коротка історія та перспективні напрямки термодинаміки. Термодинамічні системи, їх характеристики та класифікація. Термодинамічні змінні. Внутрішня енергія, температура, ентропія, тиск, об'єм, дифузійний потенціал, кількість елементів термодинамічної системи. Рівноважні та нерівноважні стани. Незалежні та залежні термодинамічні змінні. Рівняння стану. Принципи адитивності та локальної термодинамічної рівноваги. I, II та III закони термодинаміки. Основне рівняння термодинаміки. Рівність у гомогенних та гетерогенних системах. Правило фаз Гіббса. Умови сталості рівноваги. Термодинамічні потенціали Хімічний потенціал. Причини необоротності. Типи незворотних процесів. Необоротні процеси теплоперенесення, адіабатичного розширення та дифузії. Термодинамічні флуктуації. Рушійні сили та швидкості незворотних процесів. Співвідношення між значеннями рушійних сил та швидкостей процесів. Термодинамічна форма запису кінетичних рівнянь. Термодинамічні сили. Величини термодинамічних сил для хімічної реакції, градієнтів потоків температури, концентрації, хімічного потенціалу, напруженості електричного поля. Зв'язок між швидкістю процесу та термодинамічними силами. Термодинаміка потоку.

**Змістовий модуль 2.** Принцип локальної рівноваги. Термодинамічні рівняння руху макросистеми (рівняння Онзагера). Принцип Кюрі для ізотропних систем. Принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів (співвідношення Онзагера). Приклади пов'язаних потоків (перехресні явища перенесення): термомеханічний та механокалоричний ефекти; термоелектричні та термомагнітні явища; термодифузія. Стаціонарні нерівноважні стани (квазірівноважний процес). Рівняння квазірівноважного процесу (лінійне наближення): виробництво ентропії та дисипація енергії у відкритій системі, теорема Пригожина. Другий закон термодинаміки у відкритих системах. Термодинамічний критерій сталості стаціонарного стану. Принцип Ле-Шательє – Брауна. Еволюція відкритих нерівноважних систем. Універсальний критерій еволюції Гленсдорфа Пригожина. Термодинаміка нелінійних кінетичних систем. Модифіковані рівняння Онзагера для спряжених процесів далеких від рівноваги. Просторові, часові та просторово-часові дисипативні структури. Приклади появи дисипативних структур: осередки Бенару; екологічна система – хижак-жертва, рівняння Лоттки-Вольтерра; закон еволюції Дарвіна; реакція Білоусова-Жаботинського. Теорія біфуркацій. Теорія катастроф. Синергетика. Нерівноважні фазові переходи. Моделювання процесів нерівноважного структуроутворення. Турбулентність у гідравлічних потоках. Теплова конвекція як зразок явищ самоорганізації у фізиці. Рідкі кристали. Лазерне випромінювання. «Хімічний годинник» явище самоорганізації в хімії. Термодинаміка самоорганізації живих організмів та екологічних систем. Перспективи використання теорії.

#### 4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	денна форма					
	усього	у тому числі				
лек.		пр. (сем.)	лаб.	інд.	с.р.	
1	2	3	4	5	6	7
<b>Змістовий модуль 1.</b>						
Тема 1. Термодинамічний метод дослідження. Вихідні поняття та визначення	9	2	1	–	–	6
Тема 2. Термодинамічний стан. Основні постулати та початки термодинаміки	9	2	1	–	–	6
Тема 3. Умови термодинамічної рівноваги	9	2	1	–	–	6
Тема 4. Необоротні термодинамічні процеси	9	2	1	–	–	6
Тема 5. Термодинамічні потоки та сили	9	2	1	–	–	6
<b>Змістовий модуль 2.</b>						
Тема 6. Постулати (принципи) лінійної нерівноважної термодинаміки	9	2	1	–	–	6
Тема 7. Термодинамічні процеси у відкритих нерівноважних системах	9	2	1	–	–	6
Тема 8. Теоретичні основи нелінійної термодинаміки. Дисипативні структури у суттєво нерівноважних системах	9	2	1			6
Тема 9. Розвиток та перспективи теорії нелінійної термодинаміки	9	2	1	–	–	6
Тема 10. Аналіз явищ самоорганізації в галузі матеріалознавства та технології матеріалів. Самоорганізація у фізиці, хімії, біології	9	2	1	–	–	6
<b>Усього годин</b>	<b>90</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>–</b>	<b>–</b>	<b>60</b>

## 5. Теми семінарських занять

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
<b>Змістовий модуль 1.</b>		
1	Термодинамічний метод дослідження. Вихідні поняття та визначення	1
2	Термодинамічний стан. Основні постулати та початки термодинаміки.	1
3	Умови термодинамічної рівноваги	1
4	Необоротні термодинамічні процеси	1
5	Термодинамічні потоки та сили	1
<b>Змістовий модуль 2.</b>		
6	Постулати (принципи) лінійної нерівноважної термодинаміки	1
7	Термодинамічні процеси у відкритих нерівноважних системах	1
8	Теоретичні основи нелінійної термодинаміки. Дисипативні структури у суттєво нерівноважних системах	1
9	Розвиток та перспективи теорії нелінійної термодинаміки	1
10	Аналіз явищ самоорганізації в галузі матеріалознавства та технології матеріалів. Самоорганізація у фізиці, хімії, біології	1
	<b>Усього годин</b>	<b>10</b>

## 6. Самостійна робота

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
1	Термодинамічний метод дослідження. Вихідні поняття та визначення	6
2	Термодинамічний стан. Основні постулати та початки термодинаміки.	6
3	Умови термодинамічної рівноваги	6
4	Необоротні термодинамічні процеси	6
5	Термодинамічні потоки та сили	6
6	Постулати (принципи) лінійної нерівноважної термодинаміки	6
7	Термодинамічні процеси у відкритих нерівноважних системах	6
8	Теоретичні основи нелінійної термодинаміки. Дисипативні структури у суттєво нерівноважних системах	6
9	Розвиток та перспективи теорії нелінійної термодинаміки	6
10	Аналіз явищ самоорганізації в галузі матеріалознавства та технології матеріалів. Самоорганізація у фізиці, хімії, біології	6
	<b>Усього годин</b>	<b>60</b>

## 7. Методи контролю

- Перевірка засвоєння теоретичного матеріалу, в т. ч методом тестування.
- Перевірка якості виконання практичних робіт.
- Залік.

## 8. Розподіл балів, які отримують аспіранти

Поточне тестування, семінарські заняття та самостійна робота										
Змістовий модуль №1					Змістовий модуль №2					Залік
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	50

T1, T2 ... – теми змістових модулів.

## Шкала оцінювання: національна та ECTS

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	для заліку
90 – 100	<b>A</b>	відмінно	зараховано
80 – 89	<b>B</b>	добре	
70 – 79	<b>C</b>		
60 – 69	<b>D</b>	задовільно	
50 – 59	<b>E</b>		
26 – 49	<b>FX</b>	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-25	<b>F</b>	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

## 9. Методичне забезпечення

- 1) Лекції, завдання для практичних робіт.
- 2) Програмне забезпечення: навчально-контролюючі програми з кожної теми курсу.

## 10. Рекомендована література

### Базова

1. А.Г. Князева. Введение в термодинамику необратимых процессов. Томск: Изд-во «Иван Федоров», 2014. – 172 с.
2. В.Н. Пармон. Термодинамика неравновесных процессов для химиков Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2015. – 474 с.
3. И. Пригожин, Д. Кондепуди. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур М.: Мир, 2002. –461с.
4. Н.М. Сергеева, В.Г. Корсаков; под ред. Г.А. Скоробогатова Самоорганизация в физико-химических системах. СПб.: – 2011. –158 с.

### Допоміжна

5. Базаров, И. П. Термодинамика: учебник / И. П. Базаров. — СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. — 376 с.



6. Практикум по физической химии. Физические методы исследования: учебное пособие для вузов по направлению «Химия» и спец. «Химия» / Е. П. Агеев и др.; под ред. М. Я. Мельникова и др. — М.: Академия, 2014. — 528 с.
7. Афанасьев, Б. Н. Физическая химия: Учебное пособие для вузов по направлениям "Химическая технология", "Биотехнология" и "Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии" / Б. Н. Афанасьев, Ю. П. Акулова. — Санкт-Петербург: Лань, 2021. — 464 с.
8. Морачевский, А. Г. Физическая химия. Термодинамика химических реакций: учебное пособие для вузов по направлению подготовки магистров «Техническая физика» / А. Г. Морачевский, Е. Г. Фирсова. —СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2015. — 112 с.
9. Буданов, В. В. Химическая термодинамика: Учебное пособие для вузов по направлению "Химическая технология и биотехнология" и химико-технологическим направлениям подготовки дипломированных специалистов / В. В. Буданов, А. И. Максимов. — Санкт-Петербург: Лань. — 2021. — 320 с.