

ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНИХ ПРОБЛЕМ МЕХАНІКИ І МАТЕМАТИКИ  
ІМ. Я. С. ПІДСТРИГАЧА НАН УКРАЇНИ

Відділ теорії фізико-механічних полів



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ІППММ ім. Я. С. Підстригача  
НАН УКРАЇНИ, академік НАН України

  
Роман КУШНІР

Протокол від «29» 08 2024 року № 9

**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ**

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЗАСАДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

В НЕОДНОРІДНИХ ТІЛАХ

/код і назва навчальної дисципліни/

III рівень, доктор філософії

/рівень вищої освіти/

вид дисципліни \_\_\_\_\_ за вибором \_\_\_\_\_

(обов'язкова / за вибором)

мова викладання \_\_\_\_\_ українська \_\_\_\_\_

галузь знань \_\_\_\_\_ 11 Математика та статистика \_\_\_\_\_

/шифр і назва/

спеціальність \_\_\_\_\_ 113 Прикладна математика \_\_\_\_\_

/шифр і назва /

Львів – 2024 рік

Робоча програма з навчальної дисципліни «Термодинамічні засади моделювання термомеханічних процесів в неоднорідних тілах» для здобувачів освіти ступеня доктора філософії

Розробники:

Зав. відділу, доктор фіз.-мат. наук, професор



Олександр ГАЧКЕВИЧ

Пров. наук. співр., доктор фіз.-мат. наук, ст.н.с



Ростислав ТЕРЛЕЦЬКИЙ

“24” 06 2024 р.

## 1. Структура навчальної дисципліни

Найменування показників	Всього годин Денна форма навчання
Кількість кредитів/год.	4/120
Усього годин аудиторної роботи, у т. ч.:	60
• лекційні заняття, год.	30
• семінарські заняття, год.	-
• практичні заняття, год.	30
• лабораторні заняття, год.	-
Усього годин самостійної роботи, у т. ч.:	60
Екзамен	2

## 2. Мета та завдання навчальної дисципліни

### 2.1. Мета вивчення навчальної дисципліни

Метою вивчення навчальної дисципліни є ознайомлення аспірантів з базовими поняттями і положеннями термодинаміки, як основи термомеханіки деформівних твердих тіл; розуміння і засвоєння основних термодинамічних підходів до опису теплових та механічних процесів в деформівних системах та побудови моделей термомеханіки; оволодіння основними навиками математичного моделювання фізико-механічних процесів у структурно неоднорідних елементах конструкцій за дії полів різної фізичної природи.

### 2.2. Завдання навчальної дисципліни відповідно до освітньої програми

В результаті вивчення дисципліни аспірант повинен знати:

- основи термодинамічного моделювання деформування тіла (балансові співвідношення механіки);
- підходи до опису теплових процесів в деформівних системах (другий закон термодинаміки);
- методики побудови моделей термомеханіки (термомеханічної поведінки) за підходами нерівноважної та локально-рівноважної термодинаміки;
- основні положення математичного моделювання деформування та напруженого стану в механіці деформівних твердих тіл;
- модель лінійного термопружного тіла;
- постановки крайових задач термопружності в переміщеннях та напруженнях за комплексної дії теплового і силового навантажень. Класифікація задач термопружності;
- основи математичного моделювання фізико-механічних процесів у структурно неоднорідних елементах конструкцій за дії полів різної фізичної природи, зокрема електромагнітних.

Вивчення навчальної дисципліни передбачає формування та розвиток в аспірантів **компетентностей**:

#### загальних:

- 1) знання сучасних методів термодинамічного та математичного моделювання термомеханічної поведінки структурно неоднорідних тіл;
- 2) критичний аналіз, оцінка і синтез нових та складних ідей;
- 3) уміння ефективно спілкуватися з широкою науковою спільнотою та громадськістю в питаннях прикладної математики, зокрема її термодинамічних аспектів;

- 4) наполегливість у досягненні мети;
- 5) здатність самостійно розвиватися і вдосконалюватися упродовж життя, відповідальність за навчання інших;
- 6) соціальна відповідальність за результати прийняття стратегічних рішень;
- 7) ініціювання оригінальних дослідницько-інноваційних комплексних проектів;
- 8) лідерство та здатність як до автономної, так і до командної роботи під час реалізації проектів.

#### **фахових:**

- 1) знання про тенденції розвитку і найбільш важливі нові розробки в галузі термомеханіки складних структурно неоднорідних систем, а також суміжних областей;
- 2) розуміння сучасних наукових теорій і методів, вміння їх ефективно застосовувати для синтезу та аналізу складних процесів, систем та явищ;
- 3) можливість інтегрувати знання з інших дисциплін, застосовувати системний підхід та враховувати нетехнічні аспекти при розв'язанні науково-прикладних задач і виконанні досліджень.

Результати навчання даної дисципліни деталізують такі **програмні результати навчання:**

- знання та розуміння наукових й математичних принципів, що лежать в основі термодинамічного та математичного моделювання складних структурно неоднорідних систем з урахуванням процесів різної фізичної природи;
- професійні знання основних закономірностей кількісного опису процесів в рамках моделей тепло-масо-перенесення, деформування в структурно-неоднорідних середовищах;
- здатність продемонструвати поглиблені знання у вибраній спеціалізації;
- розуміння впливу технічних рішень в суспільному, економічному і соціальному контексті;
- здійснювати пошук, аналізувати і критично оцінювати інформацію з різних джерел;
- поєднувати теорію і практику, а також приймати рішення та виробляти стратегію діяльності для вирішення завдань спеціалізації з урахуванням загальнолюдських цінностей, суспільних, державних та виробничих інтересів;
- самостійно виконувати наукові дослідження та застосовувати дослідницькі навички за професійною тематикою;
- застосовувати системний підхід, інтегруючи знання з інших дисциплін та враховуючи нетехнічні аспекти, під час розв'язання задач обраної спеціалізації та проведення досліджень;
- аргументувати вибір методів розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення.

### **3. Опис навчальної дисципліни**

#### **3.1. Лекційні заняття**

<i>№ п/п</i>	<i>Найменування розділів, тем</i>	<i>Кількість год.</i>
1	Основні положення математичного моделювання в механіці деформівних тіл. Конфігураційні та кінематичні характеристики (підходи Лагранжа та Ейлера). Аксиома неперервності (суцільності). Вектор переміщення.	2
2	Тензори деформацій Гріна і Коші. Тензор малої деформації. Умови суцільності деформації, зокрема у формі Сен-Венана. Криволінійні координати.	2
3	Моделювання напруженого стану деформівного твердого тіла. Принцип розрізання Коші-Ейлера. Вектор поверхневих зусиль і тензор напружень Коші.	2

4	Зовнішні силові чинники механічної дії на тіло. Рівняння балансу маси, імпульсу (рівняння руху чи рівноваги) та моменту імпульсу.	2
5	Тензори напружень Піоли-Кірхгофа. Несиметричний тензор напружень. Механічні граничні умови.	2
6	Термодинамічне моделювання деформування тіла. Термодинамічна система і параметри її стану. Вихідні положення термодинаміки. Гомогенні і гетерогенні системи. Рівноважні і нерівноважні процеси.	2
7	Внутрішня енергія, робота та тепло. Закон збереження енергії (перший закон термодинаміки) для деформівного тіла. Гранична умова для теплового потоку.	2
8	Оборотні і необоротні процеси. Ентропія і температура як функції стану. Локально-рівноважна ентропія. Принцип локальної рівноваги. Другий закон термодинаміки (баланс ентропії). Термодинамічні потенціали.	2
9	Побудова визначальних рівнянь (рівнянь стану) та кінетичних за підходами локально-рівноважної термодинаміки. Модель лінійного термопружного тіла. Співвідношення Дюгамеля-Неймана та закон теплопровідності Фур'є для анізотропного тіла).	2
10	Притік ентропії. Рівняння теплопровідності. Початкова та граничні умови для формулювання крайової задачі теплопровідності анізотропного тіла.	2
11	Постановки крайових задач термопружності в переміщеннях та напруженнях за комплексної дії теплового і силового навантажень. Класифікація задач термопружності.	2
12	Локально-нерівноважна ентропія. Нерівність Клаузіуса-Дюгема. Побудова визначальних рівнянь (рівнянь стану) та кінетичних за підходами нерівноважної термодинаміки.	2
13	Моделі термовязкопружності.	2
14	Основи побудови моделей термомеханіки деформівних тіл за дії полів різної фізичної природи, зокрема електромагнітного поля.	2
15	Основи побудови моделі термомеханіки структурно неоднорідного (багатокомпонентного) тіла за дії полів різної фізичної природи з урахуванням процесів тепломасообміну.	2

Усього 30 год.

### 3.2. Практичні заняття

<i>№ n/n</i>	<i>Найменування розділів, тем</i>	<i>Кількість год.</i>
1.	Встановлення зв'язків, які мають місце при деформації тіла між елементами об'єму, площі, дуги та направляючими косинусами зовнішніх нормалей до елементарних площадок відповідно в вихідній і актуальній конфігураціях тіла.	2
2.	Запис умов сумісності деформацій в циліндричній та сферичній системах координат.	2
3.	Загальне формулювання рівнянь балансу для фізичних величин в інтегральній та диференціальній формах.	2
4.	Тензори деформацій і напружень в криволінійних координатах.	2
5.	Балансові рівняння механіки в криволінійних координатах.	2
6.	Приклади рівноважних, нерівноважних, квазірівноважних, оборотних і необоротних процесів. Релаксація.	2

7.	Математичне обґрунтування існування ентропії і термодинамічної температури.	2
8.	Матеріальні константи термопружного анізотропного тіла. Види симетрії.	2
9.	Особливості формулювання теплових граничних умов при різних видах теплообміну, зокрема за теплообміну випромінюванням.	2
10.	Розгляд специфіки термочутливості теплофізичних та механічних характеристик деформівного тіла.	2
11.	Постановки крайових задач термовязкопружності.	2
12.	Ознайомлення з ключовими рівняннями моделей термомеханіки для тіл різної електропровідності та здатності до поляризації та намагнічення за дії електромагнітного поля радіочастотного діапазону.	2
13.	Ознайомлення з ключовими рівняннями моделей термомеханіки для тіл різної електропровідності та здатності до поляризації та намагнічення за дії електромагнітного поля світлового діапазону частот.	2
14.	Ознайомлення з ключовими рівняннями моделей термомеханіки для багатокомпонентних тіл низької електропровідності за дії електромагнітного поля радіочастотного діапазону.	2
15.	Ознайомлення з ключовими рівняннями моделей термомеханіки для багатокомпонентних тіл низької електропровідності за дії електромагнітного поля світлового діапазону частот.	2

Усього 30 год.

### 3.3. Самостійна робота

№ п/п	Зміст роботи	К-сть годин
1.	Виконання індивідуальних науково-дослідних завдань, к-сть/год	40
2.	Підготовка до заліків та іспиту	20

Усього 60 год.

## 4. Контроль знань, політика виставлення балів

Оцінювання знань проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням:

**Контрольні роботи:** 30% загальної оцінки; максимальна кількість балів за три контрольні роботи – 30;

**Колоквіуми:** 20% загальної оцінки; максимальна кількість балів за два колоквіуми – 20;

**Індивідуальне наукове завдання:** 20% загальної оцінки; максимальна кількість балів за індивідуальне наукове завдання – 20 балів;

**Іспит:** 30% загальної оцінки; максимальна кількість балів – 30.

**Загалом** 100 балів.

**Академічна доброчесність:** Роботи аспірантів мають бути оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Виявлення ознак академічної недоброчесності (відсутність посилань на використані джерела, фабрикування джерел, списування) в письмовій роботі аспіранта є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману.

**Відвідування занять** Аспіранти повинні інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку аспіранти зобов'язані дотримуватися термінів визначених для виконання всіх видів письмових робіт та індивідуальних завдань, передбачених курсом.

**Література.** Уся література, яку аспіранти не зможуть знайти самостійно, буде надана викладачем. Аспіранти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.

**Політика виставлення балів.** Враховуються бали, набрані при поточному тестуванні, самостійній роботі та бали підсумкового тестування. При цьому береться до уваги активність

аспіранта під час практичних занять, наявність пропусків, списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і ін.

Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі аспіранта є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману.

## 5. Рекомендована література

До пунктів 1-5

1. *Nowacki W.* Thermoelasticity 2nd edition . – Oxford: Pergamon Press, 2013 – 578 p.
2. *Hutter K., van de Ven A.A.F., Ursescu A.* Electromagnetic field-matter interaction in thermoelastic solids and viscous fluids. – Berlin: Springer, 2006. – 403 p.
3. *Truesdell C.* A first course in rational continuum mechanics. – New York etc.: Acad. Press, 2016. –304 p.
4. *Lebedev L. P., Cloud M. J.* Tensor analysis. – New Jersey etc.: World Scientific, 2004. – 204 p.
5. *Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака і Р.М. Кушніра (в 5-ти томах). Т. 1. Термомеханіка багатокомпонентних тіл низької елетропровідності / Бурак Я.Й., Гачкевич О.Р., Терлецький Р.Ф. – Львів: СПОЛОМ, 2006. – 300 с.*

До пунктів 6-10

6. *Callen H. B.* Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics 2nd edition . – New York etc.: John Wiley, 1991. – 493 p.
7. *De Groot S. R. P., Mazur P.* Non-Equilibrium Thermodynamics (Dover Books on Physics) – New York: Dover Publ. 2011. – 528 p.
8. *Modest M.F.* Radiative Heat Transfer. – San Diego: Acad. Press, 2003. – 822 p.
9. *Буляндра О. Ф.* Технічна термодинаміка: Підручн. для студентів енерг. спец. вищ. навч. закладів. – К.: Техніка, 2001. – 320 с.
10. *Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака і Р.М. Кушніра (в 5-ти томах). Т. 3. Термопружність термочутливих тіл / Кушнір Р.М., Попович В.С. – Львів: СПОЛОМ, 2009. – 429 с.*
11. *Терлецький Р.Ф., Брухаль М.Б., Немировський Ю.В.* Моделювання та дослідження термомеханічної поведінки термочутливих тіл за врахування впливу теплового випромінювання // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2013. – **56**, № 2. – С. 212-224.

До пункту 11

12. *Day A. W.* The Thermodynamics of Simple Materials with Fading Memory – Springer Tracts in Natural Philosophy. – **22**. (Softcover reprint of the original 1st ed. 1972 edition) – Berlin: Springer, 2011. – 136 p.

До пунктів 12-15

13. *Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака і Р.М. Кушніра (в 5-ти томах). Т. 4. Термомеханіка намагнечуваних електропровідних термочутливих тіл / Гачкевич О.Р., Дробенко Б.Д. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 256 с.*
14. *Гачкевич О. Р., Терлецький Р. Ф.* Моделі термомеханіки намагнетовних і поляризованих електропровідних деформівних твердих тіл // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2004. – **40**, № 3. – С. 19–37.
15. *Гачкевич О., Терлецький Р., Івасько Р.* Термопружний стан намагніченої феритової пластини при поширенні об'ємних магнітостатичних хвиль // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2022. – **65**, № 2. – С. 123-135.
16. *Hachkevych O., Ivas'ko R., Stanik-Besler A.* Selected mathematical problems of thermomechanics of ferrite solids. – L'viv: Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics NAS of Ukraine, 2022. – 212 p.
17. *Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака і Р.М. Кушніра (в 5-ти томах). Т. 2. Механотермодифузія в частково прозорих тілах / Гачкевич О.Р., Терлецький Р.Ф., Курницький Т.Л. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 184 с.*
18. *Гачкевич О., Кушнір Р., Терлецький Р.* Математичні проблеми термомеханіки деформівних тіл при тепловому опроміненні // *Український математичний журнал.* – 2021. – **73**, № 10. – С. 1317-1329.