НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора

«23» квітня 2025 року

Робоча програма навчальної дисципліни

Моделювання процесів нестаціонарного деформування анізотропних конструкцій

(назва навчальної дисципліни)

підготовки докторів філософії

зі спеціальності 113 Прикладна математика

2024/2025 навчальний рік

Робочу програму навчальної дисципліни «Моделювання процесів нестаціонарного деформування анізотропних конструкцій» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Математичне моделювання та оптимізація теплових, механічних процесів і складних геометричних структур» підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Розробник програми: Угрімов Сергій Вікторович,
д-р техн. наук, старш. наук. співроб., учений секретар

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою інституту 23 квітня 2025 року, протокол № 4.

Програму схвалено на розширеному засіданні відділу нелінійної механіки та математичного моделювання.

Протокол № 1 від 21.04.2025 р.

Завідувач відділу

_____ Аврамов К. В.

Програму погоджено науково-технічною проблемною радою «Математичне моделювання. Механіка деформованого твердого тіла. Динаміка і міцність машин. Магнетизм технічних об'єктів».

Протокол № 7 від 15.04.2024 р.

Заступник голови НТПР
д-р техн. наук, проф. _____ Максименко-Шейко К. В.

1. Опис навчальної дисципліни

Мета викладання навчальної дисципліни

Забезпечити поглиблення та формування узагальнюючих теоретичних знань по механіці та динаміці анізотропних конструкцій, а також надбання практичних умінь і навичок щодо здатності застосовувати методи математичного моделювання до розв'язання задач статики та динаміки анізотропних конструкцій, які виникають при розгляді реальних елементів конструкцій у різних технологічних сферах.

Перелік компетентностей та програмних результатів навчання, що забезпечує дисципліна

Компетентності

ЗК8 Здатність виявляти, ставити і вирішувати проблеми.

ЗК10 Знання і розуміння предметної області та розуміння професії.

ЗК11 Здатність до абстрактного та аналітичного мислення й генерування ідей.

ФК 1 Здатність виявляти актуальні прикладні математичні проблеми і застосовувати поглиблені знання з прикладної математики.

ФК2 Здатність розробляти математичні моделі, що адекватно описують геометрію досліджуваних об'єктів і систем та фізичні процеси в них.

ФК3 Здатність застосовувати сучасні методи математичного моделювання і оптимізації для розв'язання задач прикладної математики.

ФК4 Здатність розробляти і вдосконалювати методи моделювання теплових та механічних процесів і оптимального проектування.

ФК5 Здатність на основі сучасних методів моделювання і оптимізації розробляти алгоритми розрахунку.

ФК7 Здатність проводити обчислювальні експерименти з обробкою розрахункових даних і їх аналізом.

ФК8 Здатність аналізувати та інтерпретувати результати розв'язання задач прикладної математики.

Програмні** результати **навчання

ПРН3 Знати і розуміти принципи побудови математичних моделей фізичних процесів.

ПРН4 Знати сучасні методи моделювання і оптимального проектування і уміти вдосконалювати їх.

ПРН7 Вміти проводити розрахункові дослідження та аналізувати отримані чисельні результати.

Характеристика навчальної дисципліни

Вибіркова освітня компонента	
Кількість кредитів	3
Рік підготовки	2-й
Семестр	2-й
Загальна кількість годин	90
Лекції	24 год.
Практичні, семінарські заняття	6 год.
Індивідуальні заняття	__ год.
Самостійна робота	60 год.
Вид підсумкового контролю	залік

2. Зв'язок з іншими освітніми компонентами

Освітні компоненти, що передують вивченню:
ОК5 Сучасні методи обчислювальної математики
ОК7 Моделі та методи нелінійної динаміки
Освітні компоненти, які розвивають результати навчання за цією дисципліною:
немає

3. Заплановані результати навчання

За результатами вивчення дисципліни аспіранти повинні

знати: загальні положення теорії пружності анізотропного тіла; основні теоретичні положення математичних методів розрахунку процесів деформування найпростіших анізотропних елементів конструкцій при дії статичних та динамічних навантажень; постановки задач аналізу хвильових процесів у ізотропних та анізотропних тілах;

вміти: формувати математичну модель фізичних процесів, що розглядаються; будувати алгоритми розрахунку для розв'язання задач деформування анізотропних конструкцій, проводити розрахунки та аналізувати отримані результати; використовувати отримані знання для розв'язання прикладних задач за спеціальністю.

розуміти: математичні підходи для описання процесів деформування анізотропних тіл; фізичну суть явищ, що відбуваються в елементах конструкцій під дією статичних та нестаціонарних навантажень.

4. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Теоретичні основи теорії пружності анізотропного тіла

Тема 1. Анізотропія. Узагальнений закон Гука.

Анізотропні матеріали. Композити, нанокомпозити, кристалічні матеріали. Загальне поняття про закон Гука та його узагальнення для анізотропного тіла**.**

Тема 2. Пружна симетрія.

Поняття про тензор деформацій і напружень та фізичну суть їх компонентів. Основні типи симетрії. Ортотропія, трансверсальна ізотропія. Симетрія та пружність кристалів**.**

Тема 3. Перетворення пружних констант при повороті осей.

Перетворення тензорів 1 та 2 рангу при повороті осей координат. Перетворення пружних констант при повороті осей. Поверхні та криві зміни пружних сталих із зміною напряму.

Тема 4. Загальні рівняння теорії пружності.

Загальні рівняння теорії пружності та постановка основних задач. Рівняння рівноваги. Варіаційна постановка. Найпростіші випадки пружної рівноваги анізотропних тіл (розтяг стержня під впливом власної ваги та осьової сили, зсув прямокутного паралелепіпеда, всебічне стиснення, згин балки моментами прикладеними на кінцях).

Тема 5. Композити, нанокомпозити, кристалічні матеріали.

Армування композитних матеріалів. Матриця та волокно. Скловолокно, вуглеволокна. Наноармування. Визначення пружних сталих для композитів та нанокомпозитів. Міцність.

Розділ 2. Нестаціонарне деформування анізотропних елементів конструкцій

Тема 1. Нестаціонарне навантаження.

Принцип Д'Аламбера. Фізичні процеси та явища, що виникають при дії на тверді тіла нестаціонарних навантажень. Механічні коливання. Коливання систем з однією степеню свободи. Вплив внутрішнього тертя. Резонанс. Динамічні напруження.

Тема 2. Основні математичні методи розв'язання задач динаміки.

Інтегрування диференційних рівнянь. Метод операційного обчислення, метод скінчених різниць, метод скінчених елементів.

Тема 3. Експериментальні методи дослідження процесів нестаціонарного деформування конструкцій.

Метод динамічного широкосмугового тензометрування. Дослідження механічних властивостей матеріалів при високошвидкісному деформуванні.

Тема 4. Нестаціонарне деформування стержня.

Рівняння повздовжніх коливань стержня. Класичне рівняння. Модель Релея. Розрахунок стержня при імпульсному навантаженні.

Тема 5. Класичні та некласичні моделі рівнянь теорії анізотропних оболонок.

Математичні моделі тонкостінних пластин та оболонок. Розрахунок коливань ортотропної пластини при імпульсному навантаженні.

Розділ 3. Ударне навантаження анізотропних конструкцій та розповсюдження хвиль

Тема 1. Основні положення теорії механічного удару.

Ударні сили та імпульс. Гіпотеза Ньютона. Поздовжній удар пружних стрижнів. Модель Герца, модель Штаермана, модель Тана (T. M. Tan) і Сана (C. T. Sun).

Тема 2. Поздовжній удар по анізотропним стержням.

Постановка та розв'язок задачі про відгук стержня на повздовжній удар твердим тілом.

Тема 3. Поперечний удар по пластинам.

Постановка та розв'язок задачі про відгук ортотропної пластини при поперечному ударі твердим тілом

Тема 4. Хвильові процеси у анізотропних тілах.

Процеси розповсюдження хвиль у тілах. Рівняння Кристофеля. Відбиття хвиль.

5. СТРУКТУРА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Назви розділів і тем	Кількість годин					
	Усього	у тому числі				
		лекції	практ.	лаб.	сем. інд.	с.р.
1	2	3	4	5	6	7
Розділ 1. Теоретичні основи теорії пружності анізотропного тіла						
Тема 1. Анізотропія. Узагальнений закон Гука	**5**	**2**				**3**
Тема 2. Пружна симетрія	**5**	**2**				**3**
Тема 3. Перетворення пружних констант при повороті осей	**5**	**1**	**1**			**3**
Тема 4. Загальні рівняння теорії пружності	**7**	**2**				**5**
Тема 5. Композити, нанокомпозити, кристалічні матеріали	**6**	**2**				**4**
Разом за розділом 1	**28**	**9**	**1**			**18**
Розділ 2. Нестаціонарне деформування анізотропних елементів конструкцій						
Тема 1. Нестаціонарне навантаження. Коливання	**6**	**2**				**4**
Тема 2. Основні математичні методи розв’язання задач динаміки	**6**	**2**				**4**
Тема 3. Експериментальні методи дослідження процесів нестаціонарного деформування конструкцій	**6**	**2**				**4**
Тема 4. Нестаціонарне деформування анізотропного стержня	**5**	**1**	**1**			**3**
Тема 5. Класичні та некласичні моделі рівнянь теорії анізотропних оболонок	**8**	**2**	**1**			**5**
Разом за розділом 2	**31**	**9**	**2**			**20**
Розділ 3. Ударне навантаження анізотропних конструкцій та хвильові процеси						
Тема 1. Основні положення теорії механічного удару	**7**	**3**				**4**
Тема 2. Поздовжній удар по анізотропним стрижням.	**8**	**1**	**1**			**6**
Тема 3. Поперечний удар по пластинам.	**8**	**1**	**1**			**6**
Тема 4. Хвильові процеси у анізотропних тілах.	**8**	**1**	**1**			**6**
Разом за розділом 2	**31**	**6**	**3**			**22**
Усього	**90**	**24**	**6**			**60**

6. Самостійна робота

Метою самостійної роботи є навчитися користуватися навчально-методичними матеріалами, бібліотечними фондами, базами даних наукової літератури і інформаційними джерелами і іншими інформаційними джерелами, складати конспекти, аналізувати матеріал, порівнювати різні наукові концепції та робити висновки. Види самостійної роботи студента: опрацювання лекційного матеріалу; опрацювання тем курсу, які виносяться на самостійне вивчення; виконання завдань для самостійної роботи, відвідування консультацій; підготовка до підсумкового контролю.

Теми для самостійного вивчення

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Композити, нанокомпозити та кристалічні матеріали в сучасній техніці	3
2	Симетрія кристалів. Гратки кристалів	3
3	Поверхні та криві зміни пружних сталих із зміною напряму	3
4	Зсув прямокутного паралелепіпеда, всебічне стискання, згин балки моментами прикладеними на кінцях	5
5	Методи визначення пружних сталих для композитів та нанокомпозитів	4
6	Коливання систем з однією степеню свободи. Вплив внутрішнього тертя. Резонанс.	4
7	Метод скінченних елементів для задач динаміки. Скінченноелементі комплекси для розв'язання задач динаміки механічних систем	4
8	Голографічні методи.	4
9	Модель Релея.	3
10	Математичні моделі для оболонок. Розрахунок коливань ортотропної пластини при імпульсному навантаженні.	5
11	Модель Штаермана. Модель T. M. Tan і C. T. Sun.	4
12	Розрахунок відгуку стрижня при повздовжньому ударі твердим тілом.	6
13	Розрахунок задачі про відгук ортотропної пластини при поперечному ударі твердим тілом	6
14	Відбиття хвиль. Побудова поверхонь хвиль для кристалів	6
Разом		**60**

Завдання для самостійної роботи*

1. Визначити компоненти тензора 2 рангу із довільними компонентами, заданими в системі координат Oxyz, у новій системі координат, яку отримано
   а) поворотом навколо осі Ox на 90^0;
   б) поворотом навколо осі Oy на 90^0;
   в) поворотом навколо осі Oz на 90^0.
2. Визначити кількість незалежних пружних констант для випадку трансверсально-ізотропного тіла, враховуючи той факт, що для ортотропного тіла кількість незалежних пружних констант становить 9.
3. Скласти скінченнорізницеву схему другого порядку по просторовим координатам для ортотропного стержня, який жорстко закріплено на одному кінці, а на інший діє розподілене повздовжне зусилля.
4. Розробити алгоритм і реалізувати його у вигляді програмного продукту для розв'язання одновимірної нестаціонарної задачі деформування ізотропного та ортропного стержня.

** за бажанням здобувача він може сам скласти перелік завдань для самостійної роботи, адаптувавши його під своє наукове дослідження, за умови узгодження переліку і змісту завдань з викладачем і науковим керівником*

7. Методи навчання

При викладанні дисципліни застосовуються словесні, наочні та практичні методи навчання. Словесні та наочні методи навчання використовуються під час лекцій, самостійної роботи, консультацій, практичні – при здійсненні студентами самостійної роботи. Під час проведення лекцій використовуються такі словесні методи як розповідь і пояснення. До числа наочних методів, які застосовуються при викладанні дисципліни, належать: ілюстрація, демонстрація, презентації.

8. Методи контролю

Поточний контроль теоретичних знань реалізується шляхом опитування та перевірки виконання завдань для самостійної роботи. На зайняттях оцінюється здатність здобувача вищої освіти приймати участь у науковій дискусії.

Контроль складової робочої програми, яка освоюється під час самостійної роботи студента, проводиться під час подання лекційного матеріалу шляхом проведення дискусії. Форма організації самостійної роботи – за робочим планом за випереджальною формою навчання.

Форма підсумкового контролю – залік.

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота та індивідуальне завдання																	Разом	Сума
Розділ 1					Розділ 2					Розділ 3				І31	І32	І3 3		
Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Т1	Т2	Т3	Т4					
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	10	10	100	100

Т1, Т2 – теми розділів. І31, І32 … – індивідуальні завдання.

Критерії оцінювання

Бали поточного контролю за кожною темою складаються з оцінювання відповідей під час усного опитування процесу засвоєння лекційного матеріалу (0,5 – розуміння окремих положень, 1 – освоєння основних теоретичних положень та методів; 1,5 — досконале засвоєння положень, 2 – вміння узагальнювати засвоєні підходи та аналізувати отримані результати), оцінювання ступеня опрацювання матеріалу тем для самостійного вивчення (0,5 – часткове розуміння матеріалу, 1 – досконале розуміння матеріалу) та оцінювання виконання завдання для самостійної роботи (0,4 – вміння вибрати математичний метод для розв’язання поставленої задачі; 0,8 – розробка методики розв’язання поставленої задачі, 1,2 – повне застосування методики з отриманням частково помилкових результатів, 1,6 – вирішення поставленої задачі в цілому, 2 – повне вирішення поставленої задачі з творчим аналізом отриманих результатів).

Критерії оцінювання індивідуальних завдань (кожне по 10 балів): Відсутність помилок в теоретичній частині – 4 бали; Коректність викладок – 3 бали; Послідовність викладок – 2 бали; Логічність викладок – 1 бал.

Після підсумовування всіх балів поточного контролю результат округлюється до цілого значення.

Шкала оцінювання знань та умінь

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка
50 ... 100	зараховано
0 … 49	незараховано

10. Рекомендоване методичне забезпечення

1. Конспект лекцій з дисципліни «Моделювання процесів нестаціонарного деформування анізотропних конструкцій» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 113 Прикладна математика галузі знань 11 Математика та статистика (освітньо-наукова програма «Математичне моделювання та оптимізація теплових, механічних процесів і складних геометричних структур») [Електронне видання] / Упоряд. С. В. Угрімов. Харків: ІЕМС НАН України, 2024. 112 с.

2. Методичні вказівки до виконання індивідуальних практичних завдань з дисципліни «Моделювання процесів нестаціонарного деформування анізотропних конструкцій» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 113 Прикладна математика галузі знань 11 Математика та статистика (освітньо-наукова програма «Математичне моделювання та оптимізація теплових, механічних процесів і складних геометричних структур») [Електронне видання] / Упоряд. С. В. Угрімов. Харків: ІЕМС НАН України, 2024. 15 с.

3. Методичні вказівки та перелік завдань для самостійної роботи з дисципліни «Моделювання процесів нестаціонарного деформування анізотропних конструкцій» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 113 Прикладна математика галузі знань 11 Математика та статистика (освітньо-наукова програма «Математичне моделювання та оптимізація теплових, механічних процесів і складних геометричних структур») [Електронне видання] / Упоряд. С. В. Угрімов. Харків: ІЕМС НАН України, 2024. 15 с.

Основна література

1. *Дудик М. В.* Сучасні методи теорії пружності (курс лекцій): навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів фізико-математичних спеціальностей / М. В. Дудик, Ю. В. Діхтяренко. Умань: ПП «Жовтий», 2015. – 108 с. https://dspace.udpu.edu.ua/bitstream/6789/4116/1/SMTP.pdf
2. *Божидарник В. В.* Елементи теорії пружності / В.В. Божидарник, Г.Т. Сулим. – Львів: Світ, 1994. – 560 с.
3. *Kaw A. K.* Mechanics of composite materials. Boca Raton : CRC Pres, Taylor & Francis Group, 2006. – 457 p. https://sarrami.iut.ac.ir/sites/sarrami.iut.ac.ir/files/files_course/01-mechanics_of_composite_materials_sbookfi.org_.pdf
4. *Трач В.М.* Опір матеріалів (спеціальний курс) теорія пружності та пластичності: підручник / В.М. Трач, А.В. Подворний. – К: Каравела, 2016.
5. Теорія пружності. Частина 1 [Електронний ресурс] : підручник / *А. Є. Бабенко, М. І. Бобир, С. Л. Бойко* [та ін.]. – Електронні текстові данні – Київ : Основа, 2009. – 244 с. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/items/fc47b658-a140-41c3-91c8-624cd7c83d60
6. *Sadd M.* Elasticity: Theory, Applications And Numerics, 3Rd Edition. Publisher. Academic Press -2014 - 462 p.

Допоміжна література

7. Композитні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова; за заг. ред. П.П. Савчука. – Луцьк: Видавець: ФОП Теліцин О.В., 2017. – 368 с.
8. *Nijssen R.P.L.* Composite Materials An Introduction. Режим доступу: https://compositesnl.nl/wp-content/uploads/2020/02/branded-book-toray-advanced-composites.pdf
9. Операційне числення : навч. посібник / *В. В. Веретельник* [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : Планета – Прінт, 2021. – 81 с. Режим доступу: https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/70518184-a57c-45cc-8d3c-4a58006ce137/content

10. *Bedford A., Drumheller D. S.* Introduction to Elastic Wave Propagation. Springer International Publishing AG; 2nd ed. 2023 edition. – 378 p.
11. *Washizu K.* Variational Methods in Elasticity & Plasticity. 3rd edition. Oxford-New York, Pergamon Press 1982. – 630 p.

Інформаційні ресурси

1. Мережа Internet.
2. Бібліотека ІЕМС НАН України.