



Математичне моделювання теплових процесів в енергетиці та промисловості

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Третій (доктор філософії)</i>
Галузь знань	14 Електрична інженерія
Спеціальність	144 «Теплоенергетика»
Освітня програма	«Теплові електричні станції та установки»
Статус дисципліни	За вибором студента
Форма навчання	Очна (денна та вечірня)
Рік підготовки, семестр	2 курс, весінній семестр
Обсяг дисципліни	4 (120)
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Практичні заняття, МКР, екзамен
Розклад занять	Згідно rozklad.kpi.ua
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н., доц., Риндюк Дмитро Вікторович, 099-055-47-04, rel_dv@ukr.net Практичні / Семінарські: к.т.н., доц., Риндюк Дмитро Вікторович, 099-055-47-04, rel_dv@ukr.net Лабораторні: не заплановано
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс (Google classroom) https://classroom.google.com/c/MjU5OTM0MzE0NDI5?cjc=sixuole

Програма навчальної дисципліни

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

Математичне моделювання тепломасообмінних процесів в енергетичній галузі, тобто дослідження цих процесів, ґрунтується на їх математичному описі, досить давно використовується в техніці. Однак, в даний час, зміст математичного моделювання, його можливості та актуальність створення математичних моделей зазнали докорінних змін. Це пов'язано, по-перше, з відомими перевагами комп'ютерних методів перед натурним експериментом, по-друге, зі швидким розвитком засобів обчислювальної техніки та її математичного забезпечення, і, нарешті, по-третє, з удосконаленням існуючих та розробкою нових чисельних методів реалізації складних математичних моделей, що використовують математичний апарат диференціального й інтегрального числення. Проведення обчислювальних експериментів з математичною моделлю, що реалізована у вигляді комп'ютерної програми, забезпечує скорочення термінів дослідження і зменшення його вартості, дозволяє прогнозувати поведінку досліджуваного об'єкта в різних, у тому числі і екстремальних, ситуаціях, створюючи таким чином основу для теплотехнічного обґрунтування проектних рішень при розробці нових і вдосконаленні існуючих енергетичних об'єктів.

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів наступних компетентностей.

ЗДАТНІСТЬ:

- ЗК 2 Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- ЗК 3 Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми.
- ЗК 4 Здатність проведення досліджень та аналізувати отримані результати на відповідному рівні.
- ФК 4 Здатність продемонструвати знання і розуміння формування і застосування математичних принципів і методів, необхідних в теплоенергетичній галузі.
- ФК 1.7 Здатність визначати ефективність програм в умовах експериментального і теоретичного дослідження за допомогою технічного і програмного забезпечення комп'ютерів, використовуючи процедури аналізу стійкості до помилок, точності, швидкодії, витрат системних ресурсів, здійснювати функціональний, інформаційний, ситуаційний, процедурно-організаційний аналіз об'єктів і процесів комп'ютеризації.

Основні завдання навчальної дисципліни.

Згідно з вимогами освітньої програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

ЗНАННЯ:

- ЗНВ 1.1 Знання і розуміння сучасних тенденцій розвитку теплотехнологій та світового енергоспоживання в теплоенергетиці, принципів і методів техніко-економічного обґрунтування енергозберігаючих технологій;
- ЗНВ 1.4 Знання і розуміння принципів і методів розробки математичних моделей, матричного представлення теплових схем;
- ЗНВ 1.5 Знання і розуміння сучасних методів оптимізації для розв'язання інженерних задач;
- ЗНВ 1.6 Знання і розуміння методів комп'ютерних розрахунків стаціонарних і нестаціонарних задач теплопровідності, конвекції, теплообміну випромінюванням та моделювання базових елементів устаткування енергетичного призначення.

УМІННЯ:

- УМВ 2.1 Уміння розробляти оптимальні конструкції та експлуатаційні режими роботи теплоенергетичного і теплотехнологічного обладнання;
- УМВ 2.2 Уміння впроваджувати результати інноваційної діяльності;
- УМВ 2.3 Уміння застосовувати сучасний програмний продукт для рішення поставлених інженерних задач.

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

Вимоги до початку вивчення - знання з курсу «Вища математика», «Інформаційні технології», «Основи моделювання технологічних систем», «Теплотехніка».

Забезпечується: «Інформаційні технології», «Вища математика», «Основи наукових досліджень та планування експерименту», «Наукова робота за темою магістерської дисертації. Науково-дослідна робота за темою магістерської дисертації».

Забезпечує: наукову роботу за темою дисертації доктора філософії.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. МАТЕМАТИЧНЕ ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ МЕХАНІКИ СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ.

1. Стаціонарна теплопровідність з внутрішнім джерелом теплоти. Плоска і тривимірна задачі. Вісесиметрична задача.

2. Статична пружність і незв'язана термopужність. Задача плоско-деформованого стану. Задача плоско-напруженого стану. Вісесиметрична задача. Тривимірна задача напружено-деформованого

стану. Співвідношення для визначення запасу міцності конструкції.

3. Стаціонарний рух в'язкої рідини.

Розділ 2. ЧИСЛОВІ МЕТОДИКИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.

1. Система дискретних рівнянь методу скінченних елементів. Екстремальна задача. Скінченно-елементна дискретизація. Переваги та недоліки МСЕ. Умови збіжності та оцінка точності.

2. Плоска задача теплопровідності. Вісесиметрична задача теплопровідності. Трикутні лінійні скінченні елементи. Чотирикутні лінійні скінченні елементи.

3. Тривимірна задача теплопровідності. Чотиригранні лінійні скінченні елементи. Шестигранні лінійні скінченні елементи. Нелінійні задачі теплопровідності.

Розділ 3. ЧИСЛОВІ МЕТОДИКИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ СТАТИЧНОЇ ПРУЖНОСТІ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.

1. Методи побудови системи дискретних рівнянь МСЕ задач НДС. Метод переміщень як мінімізація повної потенціальної енергії. Критерії збіжності задач НДС. Узагальнене варіаційне формулювання. Загальні критерії збіжності. Інші способи формулювання МСЕ. Плоскі задачі НДС і ПНС. Вісесиметрична задача напруженого стану. Тривимірна задача НДС.

2. Числова методика розв'язання задачі руху в'язкої. Застосування методу зваженої нев'язки для побудови системи дискретних рівнянь МСЕ. Метод Гальоркіна. Плоска задача усталеної течії в'язкої нестисливої рідини. Вісесиметрична задача усталеної течії в'язкої нестисливої рідини.

3. Методи розв'язання систем дискретних рівнянь. Загальні характеристики прямих методів розв'язання СЛАР. Загальні характеристики ітераційних методів розв'язання СЛАР.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова:

1. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. / А. Я. Карвацький. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 391 с.
2. Нікольський, О. І. Моделювання теплових процесів в РЕА: навчальний посібник / О. І. Нікольський, О. П. Шеремета. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 116 с.
3. Черноусенко, О.Ю. Основи наукових досліджень та інженерної творчості / О.Ю. Черноусенко, О.О. Чепелюк, Д.В. Риндюк // Навчальний посібник для студентів напрямів підготовки 144 «Теплоенергетика». – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 270 с.

Допоміжна:

1. Шамина О.Б. Методы научно-технического творчества: синтез новых технических решений. Учебное пособие. – Томск. Изд-во ТПУ, 2010. — 94 с. Основи наукових досліджень: конспект лекцій / укладач Е. В. Колісніченко. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 83 с.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань
-------	--

Розділ 1. МАТЕМАТИЧНЕ ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧ МЕХАНІКИ СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ.	
1.	Стаціонарна теплопровідність з внутрішнім джерелом теплоти. Плоска і тривимірна задачі. Вісесиметрична задача. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 6-9], [2, с. 8-11], [3, с. 5-15].
2.	Статична пружність і незв'язана термopужність. Задача плоско-деформованого стану. Задача плоско-напруженого стану. Вісесиметрична задача. Тривимірна задача напружено-деформованого стану. Співвідношення для визначення запасу міцності конструкції. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 9-18], [3, с. 20-25].
3.	Стаціонарний рух в'язкої рідини. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 19-21], [2, с. 11-14].
Розділ 2. ЧИСЛОВІ МЕТОДИКИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.	
4.	Система дискретних рівнянь методу скінченних елементів. Екстремальна задача. Скінченно-елементна дискретизація. Переваги та недоліки МСЕ. Умови збіжності та оцінка точності. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 22-31], [2, с. 16-19], [3, с. 47-59].
5.	Плоска задача теплопровідності. Вісесиметрична задача теплопровідності. Трикутні лінійні скінченні елементи. Чотирикутні лінійні скінченні елементи. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 33-49], [2, с. 19-23], [3, с. 67-79].
6.	Тривимірна задача теплопровідності. Чотиригранні лінійні скінченні елементи. Шестигранні лінійні скінченні елементи. Нелінійні задачі теплопровідності. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 49-78], [2, с. 23-24].
Розділ 3. ЧИСЛОВІ МЕТОДИКИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ СТАТИЧНОЇ ПРУЖНОСТІ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.	
7.	Методи побудови системи дискретних рівнянь МСЕ задач НДС. Метод переміщень як мінімізація повної потенціальної енергії. Критерії збіжності задач НДС. Узагальнене варіаційне формулювання. Загальні критерії збіжності. Інші способи формулювання МСЕ. Плоскі задачі НДС і ПНС. Вісесиметрична задача напруженого стану. Тривимірна задача НДС. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 87-92], [2, с. 24-34].
8.	Числова методика розв'язання задачі руху в'язкої. Застосування методу зваженої нев'язки для побудови системи дискретних рівнянь МСЕ. Метод Гальоркіна. Плоска задача усталеної течії в'язкої нестисливої рідини. Вісесиметрична задача усталеної течії в'язкої нестисливої рідини. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 129-137], [2, с. 34-37].
9.	Методи розв'язання систем дискретних рівнянь. Загальні характеристики прямих методів розв'язання СЛАР. Загальні характеристики ітераційних методів розв'язання СЛАР. Лекція супроводжується показом слайдів за темою. [1, с. 142-147], [2, с. 38-52], [3, с. 125-179].

Практичні заняття

1.	Побудова геометрії та дискретизація розрахункової області. Генерація розрахункової сітки в ручному режимі.
2.	Програмне забезпечення для дискретизації розрахункової області. Приклади застосування Gmsh для генерації розрахункових сіток.
3.	Приклади розв'язання стаціонарних задач теплопровідності та візуалізація результатів

	розрахунків.
4.	Плоска задача теплопровідності. Трикутні скінченні елементи. Чотирикутні скінченні елементи.
5.	Вісесиметрична задача теплопровідності. Трикутні скінченні елементи. Чотирикутні скінченні елементи. Тривимірна задача теплопровідності.
6.	Приклади розв'язання задач статичної пружності та візуалізація результатів розрахунків.
7.	Плоскі задачі ПДС і ПНС. Вісесиметрична задача напруженого стану.
8.	Тривимірна задача напружено-деформованого стану.

6. Самостійна робота студента/аспіранта

№ з/п	Назва тем, що виносяться на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1.	Загальний огляд розвитку тепломасообміну.	7
2.	Критерії подібності теплових явищ. Умови подібності вимушеного конвективного. Умови подібності вільної теплової конвекції.	7
3.	Математичне моделювання теплообмінних процесів.	7
4.	Основні аспекти сучасного стану математичного моделювання тепломасообмінних процесів в техніці.	7
5.	Математичне формування завдання. Розробка алгоритму чисельного розв'язання задачі.	7
6.	Методи розв'язання задач тепломасообміну. Метод кінцевих елементів. Метод кінцевих різниць. Порівняння особливостей методів кінцевих елементів та граничних елементів.	7
7.	Програмні продукти для моделювання теплообмінних процесів. Програмний продукт CosmosWorks Professional. Програмний комплекс ТріАНА-2.00.	7
8.	Програмний продукт MSC. Nastran. Програмне забезпечення із імітаційного моделювання COMSOL Multiphysics.	7
9.	Порівняння характеристик програм для термомоделювання.	7

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Вимоги викладача до студентів:

- Відвідувати лекційні і практичні заняття;
- Виконувати завдання, поставлені на практичних роботах, і вчасно їх здавати;
- Максимальна кількість балів при невчасному складанні модульних контрольних зменшується вдвічі;
- Максимальна кількість балів при невчасній здачі результатів розрахунків за практичними роботами зменшується вдвічі.

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

Рейтинг студента з навчальної дисципліни складається з балів, які він отримує за:

- 1) модульну контрольну роботу;
- 2) виконання та захист 8 завдань на практичних заняттях;
- 3) екзаменаційне завдання.

Система рейтингових балів

Система оцінки успішності за видами занять і завдань з кредитного модуля згідно з робочою навчальною програмою:

	кількість	бали	сума балів
Практичні заняття	6	відповіді на занятті 10	60
МКР	2	20	40
Сума вагових балів контрольних заходів			100

Шкала балів за відповідні рівні оцінювання з кожного виду контролю.

1. МКР:

Модульна контрольна робота. (20 балів)

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 18-20 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації), або повна відповідь з незначними неточностями – 14-17 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) та незначні помилки – 7-13 балів;

2. Практичне заняття (з розрахунку 4х питань всього 10 балів):

- «відмінно», творче розкриття питань, вільне володіння матеріалом – 9-10 балів;
- «добре», глибоке розкриття питань – 7-8 балів;
- «задовільно», не достатньо повне розкриття питань, достатня робота на практичному занятті – 6 балів.

Заохочувальні і штрафні бали:

	бали
1. Несвоєчасне виконання завдання СРС	-1...-5
2. Ведення конспекту лекцій	1...5
Сума заохочувальних і штрафних балів R_s	10

За результатами навчальної роботи за перші 7 тижнів «ідеальний студент» має набрати 26 балів. На першій атестації (8-й тиждень) студент отримує «зараховано», якщо його поточний рейтинг не менше 12 балів. За результатами 13 тижнів навчання «ідеальний студент» має набрати 31 бал. На другій атестації (14-й тиждень) студент отримує «зараховано», якщо його поточний рейтинг не менше 15.

Максимальна сума балів стартової складової складає 60. Необхідною умовою допуску до заліку є позитивна оцінка з виконання всіх завдань СРС, захист практичних занять та стартовий рейтинг не менше 30 балів. Якщо студенти набрали протягом семестру кількість балів більше 60 балів, вони мають можливість отримати іспит „автомат” відповідно до набраного рейтингу. Якщо студенти набрали протягом семестру кількість балів менш ніж 60 балів, студенти виконують екзаменаційну контрольну роботу. Кожне завдання містить два теоретичних питання (10 балів) і одну задачу. (20 балів).

Кожне питання екзаменаційної роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

- правильне раціональне рішення, або повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 18-20 (9-10) балів;
- достатньо повна відповідь, правильне рішення (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – 14-17 (7-8) балів;
- неповна відповідь, рішення з помилками (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – 13 (6) балів;
- незадовільна відповідь, або відсутність рішення (менше 60% потрібної інформації та помилки) – менше 12 (5) балів.

Сума стартових балів і балів за залікову роботу переводиться до оцінки згідно з таблицею

$R_D = R_C + R_E$	Оцінка ECTS	Традиційна оцінка
$95 \leq R_D \leq 100$	A - відмінно	відмінно
$85 \leq R_D \leq 94$	B – дуже добре	добре
$75 \leq R_D \leq 84$	C - добре	
$65 \leq R_D \leq 74$	D - задовільно	задовільно
$60 \leq R_D \leq 64$	E - достатньо	
$R_D \leq 59$	F _x - незадовільно	незадовільно
Не зараховано завдання на CPC, або є не зараховані лабораторні роботи, або $R_C \leq 30$	F – незадовільно (потрібна додаткова робота)	не допущено

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Завдання для контрольних робіт.

Контрольна робота №1:

- Загальні характеристики прямих методів розв'язання СЛАР.
- Умова сингулярності СЛАР.
- Метод виключення Гауса. Число арифметичний дій методу.
- Розріджені матриці СЛАР. Їх запис в стрічковому вигляді.
- Метод прогонки. Число арифметичний дій методу. Умови збіжності.
- Загальні характеристики ітераційних методів розв'язання СЛАР.
- У чому полягає різниця між методами простих ітерацій і Гауса-Зейделя. Умови збіжності цих методів.
- Метод спряжених градієнтів як метод мінімізації функціоналу. Алгоритм методу на прикладі квадратної матриці СЛАР.
- Алгоритм методу спряжених градієнтів на прикладі стрічкової матриці СЛАР.
- Основні етапи виконання числового моделювання фізичних процесів.
- У чому полягає сутність дискретизація розрахункової області?
- Способи апроксимації під час побудови дискретного аналогу вихідних диференціальних рівнянь залежно від обраного числового методу їх розв'язання.
- Класи розрахункових сіток. Різниця між ними.
- Характерні особливості неструктурованих сіток.
- У чому полягає проблема оптимізації тріангуляції?
- Критерії оцінки якості трикутних елементів.
- Критерії оцінки якості тетраедричних елементів.
- Методи побудови неструктурованих сіток.
- Програмне забезпечення для автоматичної генерації високоякісних сіток.
- Алгоритм генерації неструктурованої сітки простої плоскої фігури в ручному режимі.
- Програмні продукти для перегляда результатів тріангуляції.
- Структура, оператори і правила створення файла програмного забезпечення Tescplot для перегляда результатів тріангуляції та дискретизації чотирикутниками.
- Призначення та основна характеристика програмного продукту Gmsh.
- Базові геометричні примітиви Gmsh.
- Команди для роботи з геометричними об'єктами.

- Генерація сітки та її запис в Gmsh.
- Алгоритми генерації сіток, що використовуються в Gmsh.
- Геометричні типи скінченних елементів, які використовуються в програмі Gmsh.
- Структура msh-файла програми Gmsh.
- Структура лістингу файла 2D.geo для побудови геометрії пластини.
- Структура лістингу файла 3D.geo для створення геометрії $\frac{1}{4}$ фланця.

Контрольна робота №2:

- Перелік вихідних даних для розв'язання плоскої задачі теплопровідності консольної балки.
- Порядок виконання тріангуляції плоскої фігури (консольної балки) в ручному режимі.
- Структура файла Tecplot 360 для перевірки правильності тріангуляції.
- Порядок задання граничних умов III роду.
- Основні етапи розв'язання плоскої задачі теплопровідності та їх аналіз.
- Структура файла Tecplot 360 для візуалізації результатів розрахунків плоскої задачі теплопровідності під час її розв'язання з використанням трикутних СЕ.
- Різниця між файлами Mathcad для розв'язання плоскої задачі теплопровідності чотирикутними та трикутними елементами.
- Порядок виконання дискретизації плоскої фігури (консольної балки) чотирикутними СЕ в ручному режимі.
- Структура файла Tecplot 360 для візуалізації результатів розрахунків плоскої задачі теплопровідності під час її розв'язання з використанням чотирикутних СЕ.
- Перелік вихідних даних для розв'язання вісесиметричної задачі теплопровідності фланця.
- Різниця між файлами Mathcad для розв'язання вісесиметричної задачі теплопровідності чотирикутними та трикутними елементами.
- Вихідні дані для розв'язання стаціонарної тривимірної задачі теплопровідності фланця.
- Файл програми Gmsh для побудови геометрії фланця. Тріангуляція, визначення номерів поверхонь фланця.
- Особливості задання граничних умов під час розв'язання тривимірної задачі теплопровідності.
- Структура файла Tecplot 360 для візуалізації результатів розрахунків тривимірної задачі теплопровідності.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено к.т.н., доц. Риндюком Д.В.

Ухвалено кафедрою ТЕУТ та АЕС (протокол № 12 від 10.06.2020)

Погоджено Методичною радою факультету (протокол № __ від _____)