



# Моделювання в енергетиці

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>14 Електрична інженерія</i>
Спеціальність	<i>144 «Теплоенергетика»</i>
Освітня програма	<i>«Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій»</i>
Статус дисципліни	<i>Варіативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, осінній семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>3 (90)</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Практичні, МКР, екзамен</i>
Розклад занять	<i>Згідно rozklad.kpi.ua</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н., доц., Риндюк Дмитро Вікторович, 099-055-47-04, <a href="mailto:rel_dv@ukr.net">rel_dv@ukr.net</a> Практичні заняття: к.т.н., доц., Риндюк Дмитро Вікторович, 099-055-47-04, <a href="mailto:rel_dv@ukr.net">rel_dv@ukr.net</a>
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс (Google classroom) <a href="https://classroom.google.com/c/MzY1NTU0OTg1OTA5?cjc=adtsule">https://classroom.google.com/c/MzY1NTU0OTg1OTA5?cjc=adtsule</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

Моделювання – інструмент пізнання світу. Мову, якою розмовляє природа, ми успішно можемо перевести на мову математики і усвідомити структуру взаємозв'язків будь-якого явища. І, після того, як ми ці зв'язки формалізуємо, ми можемо будувати моделі, передбачати майбутні стани явищ, які цими моделями описуються, лише на папері або всередині пам'яті обчислювальних машин. Завдяки застосуванню математичного моделювання нам не потрібно проводити дорогі і небезпечні для життя експерименти, перш ніж реалізувати якийсь складний проект.

У процесі пізнання та практичної діяльності людство широко застосовує різноманітні моделі. Найбільш важливим, в сучасних умовах розвитку людства, різновидом моделювання є математичне.

Математичне моделювання це потужний інструмент розв'язування технологічних, інженерних і наукових проблем, що ґрунтується на використанні математичних моделей. Без підтримки у вигляді математичних методів прогнозування, моделювання та аналізу досягти успіху в сучасних умовах неможливо.

Дана навчальна дисципліна спрямована на ознайомлення здобувачів з сучасним станом розвитку математичного моделювання технологічних систем, підготовки студентів до самостійного створення таких моделей для розв'язання практичних і наукових завдань при рішенні різноманітних науково-технічних задач у сфері енергетики.

## **Метою навчальної дисципліни є формування у студентів компетентностей.**

- ЗК1 Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.
- ЗК2 Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- ФК 1 Здатність застосовувати та удосконалювати математичні та комп'ютерні моделі, наукові і технічні методи та сучасне комп'ютерне програмне забезпечення для розв'язання складних інженерних задач в теплоенергетиці.
- ФК 3 Здатність застосовувати релевантні математичні методи для розв'язання складних задач в теплоенергетиці.

## **Основні завдання навчальної дисципліни.**

Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

- РН 2 Аналізувати і обирати ефективні аналітичні, розрахункові та експериментальні методи розв'язання складних задач теплоенергетики.
- РН 5 Розробляти і досліджувати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі об'єктів та процесів теплоенергетики, перевіряти адекватність моделей, порівнювати результати моделювання з іншими даними та оцінювати їх точність і надійність.
- РН 20 Знання і розуміння сучасних методів оптимізації для розв'язання інженерних задач.

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

Вимоги до початку вивчення - знання на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти з вищої математики, фізики, інформаційних технологій, гідро- та газодинаміки, термодинаміки.

Забезпечується: Вища математика, фізика, термодинаміка, інформаційні технології, основи моделювання технологічних систем.

Забезпечує: набуті знання та навички можуть бути використані студентом на будь-якому етапі навчання.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

Розділ 1. Вступ.

Тема 1.1. Загальна характеристика математичного моделювання. Етапи побудови математичної моделі.

Розділ 2. Приклади статичних і динамічних задач.

Тема 2.1. Обчислення рівня рідини в резервуарі.

Тема 2.2. Еволюція температурного поля в барабані котла.

Розділ 3. Моделювання аеродинаміки та тепломасообміну в наскрізних двофазових потоках.

Тема 3.1. Сили, що діють на частинки. Аеродинаміка двофазової суміші.

Тема 3.2. Нагрівання термічно тонких тіл.

Тема 3.3. Нагрівання термічно масивних тіл.

Розділ 4. Моделювання процесів переносу в концентрованих дисперсних системах.

Тема 4.1. Щільний шар.

Тема 4.2. Циркулюючий киплячий шар. Модель ідеального перемішування.

Тема 4.3. Циркулюючий киплячий шар. Модель ідеального витіснення.

Розділ 5. Моделювання турбулентних двофазових потоків.

Тема 5.1. Основні відомості про турбулентність.

Тема 5.2. Обчислення пульсаційних швидкостей і температур частинок.

Тема 5.3. Побудова моделей нульового, першого і другого рівня.

Розділ 6. Конвективний перенос теплоти двофазовим потоком.

Тема 6.1. Експериментальні факти. Підхід до побудови моделі.

Тема 6.2. Моделювання впливу частинок на турбулентні характеристики газового потоку.

Тема 6.3. Обчислення інтенсивності теплообміну.

Розділ 7. Додаткові питання.

Тема 7.1. Зношування поверхонь нагріву пиловугільних котлів.

Тема 7.2. Моделювання робочого процесу у краплинній градирні.

Тема 7.3. Моделювання робочого процесу у бризкальному басейні.

Тема 7.4. Побудова емпіричних моделей. Елементи статистичної теорії екстремальних експериментів. Пошук екстремума складної функції.

Рекомендована тематика практичних (семінарських) занять.

Практичні заняття проводяться з метою закріплення теоретичних знань по основним розділам курсу.

Приблизний перелік тем:

1. Обчислення рівня рідини в резервуарі
2. Еволюція температурного поля в барабані котла
3. Аеродинаміка двофазової суміші
4. Нагрівання термічно тонких тіл та масивних тіл
5. Циркулюючий киплячий шар. Модель ідеального перемішування. Модель ідеального витіснення.
6. Обчислення пульсаційних швидкостей і температур частинок
7. Моделювання впливу частинок на турбулентні характеристики газового потоку.
8. Обчислення інтенсивності теплообміну
9. Моделювання робочого процесу у краплинній градирні

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

##### *Перелік основної літератури*

1. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. – М.: Наука, 1978.

2. Мигай В. К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.

3. Шрайбер А. А., Глянченко В. Д. Термическая обработка полидисперсных материалов в двухфазном потоке. – К.: Наук. думка, 1976. – 156 с.

4. Шрайбер А. А., Милютин В. Н., Яценко В. П. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом. – К.: Наук. думка, 1980. – 250 с.

5. Стернин Л. Е., Шрайбер А. А. Многофазные течения газа с частицами. – М.: Машиностроение, 1994. – 320 с.

6. Шрайбер А. А., Гавин Л. Б., Наумов В. А., Яценко В. П. Турбулентные течения газозвеси. – К.: Наук. думка, 1987. – 240 с.

7. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. – 340 с.

### Перелік додаткової літератури

1. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация атомных электростанций. – М.: Наука, 1984.
2. Серов Е. П., Корольков Б. Н. Динамика парогенераторов. – М.: Энергоиздат, 1981.
3. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. – М.: Машиностроение, 1974. – 212 с.
4. Кунии Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдооживление. – М.: Химия, 1976. – 448 с.
5. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.
6. Шрайбер О. А. Моделювання теплових та фізико-хімічних процесів у щільному шарі зернистого матеріалу // Пром. теплотехника, № 2, с. 21 – 27, 2005.
7. Шрайбер А. А. Кинетика горения твердого топлива в циркулирующем кипящем слое // Пром. теплотехника, № 4-5, с. 120 – 126, 1997.
8. Гаев Е. А. Метод теплового расчета крупномасштабных брызгальных систем // Пром. теплотехника, № 4, с. 53 – 61, 1987.
9. Шрайбер А. А., Баштовой А. И. Математическое моделирование тепломассообменных процессов в градирнях нового поколения // Пром. теплотехника, № 5, с. 28 – 33, 2005.
10. Nosach V. G., Shraiber A. A., Sklyarenko E. V. Mathematical modeling of heat and mass transfer in a concentrated disperse system with chemical reactions // Proc. 10<sup>th</sup> Workshop on Two-Phase Flow Predictions. – Halle, 2002. – P. 412 – 417.

### Навчальний контент

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

##### Розділ 1

##### Вступ

Тема 1.1. Загальна характеристика математичного моделювання. Етапи побудови математичної моделі

Лекція 1. Фізичне і математичне моделювання. Внутрішні і зовнішні параметри. Прямі та зворотні задачі. Етапи побудови математичної моделі.

Осн. літ-ра: 1, 2. Дод. літ-ра: 1, 2.

Завдання на СРС: вивчити методи оцінки адекватності моделей.

##### Розділ 2

##### Приклади статичних і динамічних задач

Тема 2.1. Обчислення рівня рідини в резервуарі

Лекція 2. Статична і динамічна задачі про рівень рідини. Випадок малих відхилень від рівноваги. Час повного випуску рідини.

Осн. літ-ра: 1. Дод. літ-ра: 1, 2.

Тема 2.2. Еволюція температурного поля в барабані котла.

Лекція 3. Постановка задачі. Можливості зниження її розмірності. Основні рівняння. Метод інтегрування

Осн. літ-ра: 1, 2. Дод. літ-ра: 1, 2.

Завдання на СРС: змодельовати інтенсивність теплового потоку між нижньою і верхньою половинами барабана котла.

### **Розділ 3**

#### **Моделювання аеродинаміки та тепломасообміну в наскрізних двофазових потоках**

Тема 3.1. Сили, що діють на частинки. Аеродинаміка двофазової суміші.

Тема 3.2. Нагрівання термічно тонких тіл.

Лекція 4. Аеродинамічний опір. Сили Магнуса, Сафмена і термофореза. Обчислення параметрів руху частинок. Теплообмін газу з частинками.

Осн. літ-ра: 3 – 5. Дод. літ-ра: 3.

Тема 3.3. Нагрівання термічно масивних тіл.

Лекція 5. Постановка задачі. Допоміжна задача про нагрівання масивного тіла. Апроксимаційний метод. Зведення до системи алгебричних рівнянь. Інтегрування жорстких рівнянь.

Осн. літ-ра: 3, 4. Дод. літ-ра: 5.

Завдання на СРС: вивчити експериментальні дані про коефіцієнт аеродинамічного опору та число Нуссельта при обтіканні частинки газовим потоком.

### **Розділ 4**

#### **Моделювання процесів переносу в концентрованих дисперсних системах**

Тема 4.1. Щільний шар.

Лекція 6. Процеси переносу у щільному шарі. Ітераційний метод визначення температур і теплових потоків. Виведення основних рівнянь моделі.

Осн. літ-ра: 6. Дод. літ-ра: 6, 10.

Тема 4.2. Циркуючий киплячий шар. Модель ідеального перемішування.

Лекція 7. Поняття про феноменологічні і статистичні моделі. Кінетичне рівняння та його інтегрування. Аналіз числових результатів.

Осн. літ-ра: 5. Дод. літ-ра: 4, 7.

Тема 4.3. Циркуючий киплячий шар. Модель ідеального витіснення.

Лекція 8. Виведення кінетичного рівняння. Методи інтегрування рівнянь у частинних похідних. Побудова розв'язку. Автомодельність розподілу частинок за ступенем завершеності реакції.

Осн. літ-ра: 5, 6. Дод. літ-ра: 4, 7.

Завдання на СРС: вивчити методи побудови математичних моделей процесів переносу у щільних та киплячих шарах.

### **Розділ 5**

#### **Моделювання турбулентних двофазових потоків**

Тема 5.1. Основні відомості про турбулентність.

Лекція 9. Осереднені та пульсаційні компоненти параметрів потоку. Процедура Рейнольдса. Кореляції та спектри. Гіпотеза Буссінеска. Теорія Прандтля. Пограничний шар.

Осн. літ-ра: 4, 6.

Тема 5.2. Обчислення пульсаційних швидкостей і температур частинок.

Лекція 10. Рівняння для пульсаційних параметрів частинок. Методи інтегрування. Аналіз числових результатів.

Осн. літ-ра: 4, 6.

Тема 5.3. Побудова моделей нульового, першого і другого рівня.

Лекція 11. Рівняння збереження кінетичної енергії турбулентних пульсацій і швидкості її дисипації. Побудова моделей турбулентного потоку. Інтегрування рівнянь.

Осн. літ-ра: 6.

Завдання на СРС: вивчити метод прогонки для інтегрування диференціальних рівнянь другого порядку.

## Розділ 6

### Конвективний перенос теплоти двофазовим потоком

Тема 6.1. Експериментальні факти. Підхід до побудови моделі.

Лекція 12. Вплив концентрації і розміру частинок, діаметра каналу та числа Рейнольдса на теплообмін двофазового потоку зі стінкою. Теоретичні засади моделювання процесу.

Осн. літ-ра: 4, 6. Дод. літ-ра: 5.

Тема 6.2. Моделювання впливу частинок на турбулентні характеристики газового потоку.

Лекція 13. Вихідні рівняння. Гіпотеза Буєвича. Обчислення профілю швидкості газу.

Осн. літ-ра: 4, 6.

Тема 6.3. Обчислення інтенсивності теплообміну.

Лекція 14. Моделювання турбулентних характеристик частинок. Побудова рівняння для числа Нуссельта. Пошук емпіричних констант.

Осн. літ-ра: 4, 6.

Завдання на СРС: вивчити вплив частинок на турбулентні характеристики газового потоку.

## Розділ 7

### Додаткові питання

Тема 7.1. Зношування поверхонь нагріву пилувугільних котлів.

Лекція 15. Формула ЦКТІ для інтенсивності зношування. Обчислення швидкості і концентрації частинок. Аналіз результатів.

Осн. літ-ра: 2.

Тема 7.2. Моделювання робочого процесу у краплинній градирні.

Лекція 16. Побудова системи рівнянь. Ітераційні методи інтегрування. Аналіз числових результатів.

Осн. літ-ра: 5. Дод. літ-ра: 9.

Тема 7.3. Моделювання робочого процесу у бризкальному басейні.

Лекція 17. Побудова системи рівнянь та граничних умов. Метод інтегрування.

Осн. літ-ра: 6. Дод. літ-ра: 8

Тема 7.4. Побудова емпіричних моделей. Елементи статистичної теорії екстремальних експериментів. Пошук екстремума складної функції.

Лекція 18. Постановка експерименту та обробка і узагальнення дослідних даних. Методи крутого сходження та дослідження майже стаціонарної області.

Осн. літ-ра: 7.

Завдання на СРС: вивчити модель руху рідини через проникну шорсткість.

### 6. Самостійна робота студента/аспіранта

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1.	вивчити методи оцінки адекватності моделей.	11
2.	змоделювати інтенсивність теплового потоку між нижньою і верхньою половинами барабана котла.	11
3.	вивчити експериментальні дані про коефіцієнт аеродинамічного опору та число Нуссельта при обтіканні частинки газовим потоком.	11
4.	вивчити методи побудови математичних моделей процесів переносу у щільних	11

	та киплячих шарах.	
5.	вивчити метод прогонки для інтегрування диференціальних рівнянь другого порядку.	11
6.	вивчити вплив частинок на турбулентні характеристики газового потоку.	11

## 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: Рейтинг студента з кредитного модуля складається з балів, які він отримує за:

- 1) Модульна контрольна робота;
- 2) Практичні заняття
- 3) Екзамен.

#### Система рейтингових балів

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

	кількість	бали	сума балів
МКР	1	результати оцінювання МКР	15
Практичні заняття	9	результати оцінювання	45
<b>Сума вагових балів контрольних заходів</b>			<b>60</b>

#### Шкала балів за відповідні рівні оцінювання з кожного виду контролю.

##### 1. МКР:

Модульна контрольна робота. (15 балів)

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 15-12 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації), або повна відповідь з незначними неточностями – 11-9 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) та незначні помилки – 8-4 балів;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (не відповідає вимогам) – 3-0 балів.

##### 2. Практичні роботи:

Практична робота. (5 балів)

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 5 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації), або повна відповідь з незначними неточностями – 4 бали;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) та незначні помилки – 3 бали;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (не відповідає вимогам) – 2-0 балів.

### Заохочувальні і штрафні бали:

бали

1. Не своєчасне виконання практичної роботи	-1
2. Не своєчасне виконання МКР	-2
3. Не своєчасний захист практичної роботи	-2
4. Ведення конспекту лекцій	1...5
<b>Сума заохочувальних і штрафних балів <math>R_S</math></b>	<b>10</b>

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 МКР стартовий рейтинг не менше 30 балів. Якщо студенти набрали протягом семестру кількість балів більше 60 балів, вони мають можливість отримати залік „автомат ” відповідно до набраного рейтингу. Якщо студенти набрали протягом семестру кількість балів менш ніж 60 балів, студенти виконують залікову контрольну роботу. Кожне завдання містить два теоретичних питання (10 балів ) і одну задачу. (20 балів).

Кожне питання залікової 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 <sub>X</sub> - незадовільно	незадовільно
Не зараховано завдання на СРС, або є не зараховані лабораторні роботи, або $R_C \leq 30$	F – незадовільно (потрібна додаткова робота)	не допущено



*Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль розміщено у дистанційному курсі за посиланням <https://classroom.google.com/c/MzY1NTU0OTg1OTA5?cjc=adtsule>*

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

**Складено** к.т.н., доц. Риндюком Д.В.

**Ухвалено** кафедрою ТЕУТ та АЕС (протокол № 19 від 18.06.2021)

**Погоджено** Методичною радою університету (протокол № 11 від 24.06.2021)