



## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ. ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І ЕНЕРГОУСТАТКУВАННЯ

### Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

#### Реквізити навчальної дисципліни

|                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рівень вищої освіти                         | Третій (освітньо-науковий)                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Галузь знань                                | 14 Електрична інженерія                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Спеціальність                               | 144 Теплоенергетика                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Освітня програма                            | Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика                                                                                                                                                                                                                                    |
| Статус дисципліни                           | Професійна підготовка                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Форма навчання                              | очна (денна)/дистанційна/змішана                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Рік підготовки, семестр                     | 2 курс, осінній                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Обсяг дисципліни                            | 120 годин / 4 кредити ЄКТС<br>(лекційні заняття – 16 год., практичні заняття – 14 год., самостійна робота – 90 год.)                                                                                                                                                                  |
| Семестровий контроль/ контрольні заходи     | Екзамен                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Розклад занять                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Мова викладання                             | Українська                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Інформація про керівника курсу / викладачів | Лектори: д.т.н., ст. наук. співр, Давиденко Борис Вікторович,<br><a href="mailto:bdavydenko@ukr.net">bdavydenko@ukr.net</a><br>д.т.н., проф. Круковський Павло Григорович,<br><a href="mailto:kruk_2@ukr.net">kruk_2@ukr.net</a><br>Практичні: к.т.н., ст. наук. співр, Кобзар Сергій |
| Розміщення курсу                            | Посилання на дистанційний ресурс (Moodle, Google classroom, тощо)                                                                                                                                                                                                                     |

#### Програма навчальної дисципліни

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

Навчальна дисципліна «Моделювання процесів тепломасоперееносу. Цифрові двійники енергетичних об'єктів і енергоустаткування» дозволить отримати теоретичні знання та практичні навички з застосування чисельних методів дослідження процесів тепломасообміну в енергетичному обладнанні та в іншому устаткуванні, в якому відбуваються процеси перенесення теплоти та маси. Ці знання дадуть змогу аспірантам самостійно складати та застосовувати на практиці методи чисельного аналізу процесів перенесення теплоти і маси, складати розрахункові схеми та виконувати математичну обробку результатів досліджень. Програма навчальної дисципліни «Моделювання процесів тепломасоперееносу. Цифрові двійники енергетичних об'єктів і енергоустаткування» складена відповідно до освітньо-професійної програми підготовки для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика».

**Метою** навчальної дисципліни «Моделювання процесів тепломасоперееносу. Цифрові двійники енергетичних об'єктів і енергоустаткування» є ознайомлення аспірантів другого року навчання з загальними основами чисельного аналізу процесів тепломасоперееносу, що дозволяє виконувати детальні розрахунки полів температур, швидкостей, тисків і концентрації багатокомпонентних потоків в елементах енергетичного обладнання та в іншому устаткуванні. Розглядаються також сучасні програмні середовища для означеного

моделювання, а також технологія цифрових моделей-двійників для забезпечення оптимізації параметрів і керування енергетичним обладнанням і устаткуванням.

**Предметом** навчальної дисципліни є методи чисельного аналізу, моделі та алгоритми чисельного розв'язання задач гідродинаміки та тепломасообміну, методи побудови скінченно-різницевих схем для розв'язання рівнянь математичної фізики, а також сучасні програмні середовища для означеного моделювання і технологія цифрових моделей-двійників.

**Компетентності:** (ЗК1) Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу; (ЗК3) Здатність розв'язувати комплексні проблеми у сфері теплоенергетики на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору із дотриманням принципів професійної етики та академічної доброчесності; (СК1) Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукові результати, які створюють нові знання у сфері теплоенергетики та дотичних до неї міждисциплінарних напрямках; (СК5) Здатність ініціювати, розробляти і реалізовувати комплексні інноваційні проекти в теплоенергетиці та дотичні до неї міждисциплінарні проекти, лідерство під час їх реалізації.

**Програмні результати навчання:** (PH01) Мати передові концептуальні та методологічні знання з теплоенергетики і на межі предметних галузей, а також дослідницькі навички, достатні для проведення наукових і прикладних досліджень на рівні останніх світових досягнень з теплоенергетики, отримання нових знань та/або здійснення інновацій; (PH03) Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичного аналізу, експериментальних досліджень, спостережень, тощо і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні літературні дані; (PH04) Розробляти та досліджувати концептуальні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно використовувати їх для отримання нових знань та/або створення інноваційних продуктів у теплоенергетиці та дотичних міждисциплінарних напрямках; (PH06) Розробляти та реалізовувати наукові та/або інноваційні інженерні проекти, які дають можливість переосмислити наявне та створити нове цілісне знання та/або професійну практику і розв'язувати значущі наукові та технологічні проблеми теплоенергетики з дотриманням норм академічної етики і врахуванням соціальних, економічних, екологічних та правових аспектів.

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

До початку вивчення дисципліни аспіранти повинні мати базові знання з вищої математики, загальної фізики, гідродинаміки, технічної термодинаміки, теорії тепломасообміну. Курс лекцій базується на таких курсах: «Механіка рідини та газу», «Теплопередача», «Чисельні методи». Компетентності та програмні результати навчання, одержані в процесі вивчення дисципліни, є необхідними для подальшого якісного виконання аспірантами індивідуальних наукових досліджень та складання дисертаційної роботи на здобуття вченого ступеня доктора філософії.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

**Тема 1.** Особливості чисельного дослідження процесів теплоперенесення і динаміки рідини в теплоенергетичному обладнанні.

**Тема 2.** Чисельні методи розв'язання нелінійних та трансцендентних рівнянь.

**Тема 3.** Чисельне розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

**Тема 4.** Методи чисельного диференціювання та інтегрування функцій.

**Тема 5.** Чисельне розв'язання звичайних диференціальних рівнянь першого порядку.

**Тема 6.** Чисельне розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь першого порядку та рівнянь вищого порядку.

**Тема 7.** Метод сіток для розв'язання диференціального рівняння теплопровідності. Явна та неявна схеми скінчено-різницевої апроксимація рівняння. Апроксимація граничних умов.

**Тема 8.** Методи розв'язання скінчено-різницевого рівняння теплопровідності, що складене за явною схемою. Стійкість різницевої схеми.

**Тема 9.** Методи розв'язання скінчено-різницевого рівняння теплопровідності, що складене за неявною схемою

**Тема 10.** Скінчено-різницева апроксимація рівняння збереження енергії для потоку рідкого середовища. Апроксимація перших похідних за схемою "проти потоку"

**Тема 11.** Чисельне розв'язання системи рівнянь динаміки в'язкої рідини у змінних «функція току - вихор».

**Тема 12.** Чисельне розв'язання системи рівнянь динаміки в'язкої рідини у змінних «складові швидкості - тиск». Метод штучної стисливості.

**Тема 13.** Алгоритм SIMPLE та SIMPLER для чисельного розв'язання системи рівнянь динаміки в'язкої рідини у змінних «складові швидкості - тиск».

**Тема 14.** Чисельні методи інтерполяції та апроксимації функцій. Метод найменших квадратів для апроксимації функціональної залежності у вигляді поліномів.

**Тема 15.** Інтерполяція функцій за допомогою кубічного сплайну.

**Тема 16.** Сучасні програмні середовища для моделювання процесів тепломасопереноса і динаміки рідини в теплоенергетичному обладнанні

**Тема 17.** Технологія цифрових двійників для моделювання і керування енергетичних об'єктів і енергоустаткування.

#### **4. Навчальні матеріали та ресурси**

##### **Базова література**

1. Задачин В. М., Конюшенко І. Г. Чисельні методи: навчальний посібник. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.
2. Цегелик Г.Г. Чисельні методи: Підруч. для студ. вищ. навч. закл. Львів. Нац. ун-т ім. І.Франка. Л., 2004. 407с.
3. Каленюк П. І., Бакалець В. А., Бакалець І. І., Горбачова Н. В., Сохан П. Л. Вступ до числових методів: Навч. посіб. для вищ. закл. освіти. Держ. ун-т «Львів. політехніка». Л., 2000. 145 с.
4. Кутнів М. В. Чисельні методи: навчальний посібник. Львів.: Видво «Растр-7», 2010. 288 с.
5. Литвинов А. Л. Чисельні методи: теорія і практика: навчальний посібник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. 166 с.
6. Полтораченко Н. І., Теренчук С. А., Убайдуллаєв Ю. Н. Практикум із чисельних методів: навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2023. 160 с. ISBN 978-966-627-251-8
7. Волонтир Л.О, Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А. Чисельні методи: Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 322 с.
8. Загорулько А. В., Кайота Д. О. Обчислювальна гідроаеромеханіка: конспект лекцій. Суми: Сумський державний університет, 2019. 102 с.

##### **Додаткова література**

(факультативно / ознайомлення)

9. Фельдман Л. П., Петренко А. І., Дмитрієва О. А. Чисельні методи в інформатиці. К.: Видавнича група BHV. 2006. 480 с.

10. Мусіяка В.Г. Основи числових методів. Дніпро: ЛІРА, 2017. 256 с. ISBN 978-966-383-938-7.
11. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Новіков В.Г., Гончарук С.М. Теплопередача через віконні конструкції. Київ: Наукова думка, 2024. 208 с.
12. Minkowycz W. J., Sparrow E. M., Murthy J. Y. Handbook of Numerical Heat Transfer. Wiley; 2nd edition: 2006. 992 p.
13. Jiuyan Tu, Guan-Hend Yeoh, Chaoqun Liu. Computational fluid dynamics. A practical approach. Book. Third Edition. Elsevier Ltd.: 2019. 477 p.
14. Joel H. Ferzige Milovan Perić, Robert L. Street. Computational Methods for Fluid Dynamic. Fourth Edition. Springer Nature Switzerland AG: 2020. 596 p.
15. Abdulnaser Sayma. Computational fluid dynamics. Ventus Publishing ApS: 2009. 133 p.
16. Баранюк О. В., Воробйов М. В., Рачинський А. Ю. CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки засобами програмного комплексу: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид. «Політехніка», 2023. 164 с.
17. Цифрові двійники для промислового застосування. Визначення, комерційна цінність, аспекти розробки, стандарти та приклади використання. An Industrial Internet Consortium White Paper Version 1.0 2020-02-18
18. Digital Twin Technology. Edited by Gopal Chaudhary, Manju Khari, and Mohamed Elhoseny/ 2022 Taylor & Francis Group, LLC. ISBN: 9780367677954 (hbk). <https://doi.org/10.1201/9781003132868>
19. Суліма І.М., Мейш В.Ф. Чисельні методи із застосуванням MATLAB. К.: Вид-во НАУ, 2003. 320 с.

#### Навчальний контент

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

Навчальна дисципліна охоплює 16 годин лекцій, 14 годин практичних занять і 90 годин самостійної роботи.

Практичні заняття з дисципліни проводяться з метою закріплення теоретичних положень навчальної дисципліни і набуття аспірантами умінь і досвіду застосовувати на практиці методи чисельного аналізу, самостійно складати скінчено-різницеві схеми для розв'язання диференціальних рівнянь математичної фізики та реалізовувати їх на практиці для чисельного розв'язання задач тепломасоперенесення. Виходячи з розподілу часу на вивчення дисципліни, рекомендується чотирнадцять практичних занять.

Методи та форми навчання включають лекції, практичні заняття та самостійну роботу. Застосовуються стратегії активного навчання, які визначаються такими технологіями: візуалізація та інформаційно-комунікаційні технології, зокрема електронні презентації для лекційних занять.

#### Лекційні заняття

| № з/п | Назва теми лекції та перелік основних питань<br>(перелік дидактичних засобів, посилання на інформаційні джерела)                     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Особливості чисельного дослідження процесів теплоперенесення і динаміки рідини в теплоенергетичному обладнанні.<br>Література [7, 8] |
| 2     | Чисельні методи розв'язання нелінійних та трансцендентних рівнянь<br>Література [1, 2, 3, 4, 5]                                      |
| 3     | Чисельне розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь<br>Література [1, 2, 3, 4, 5, 7]                                           |

|    |                                                                                                                                                                                                |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4  | Методи чисельного диференціювання та інтегрування функцій<br>Література [1, 2, 3, 4, 5, 7]                                                                                                     |
| 5  | Чисельне розв'язання звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Метод Ейлера та метод Рунге-Кутта.<br>Література [1, 2, 3, 4, 5, 7]                                                    |
| 6  | Чисельне розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь першого порядку та рівнянь вищого порядку.<br>Література [1, 3, 5, 6]                                                            |
| 7  | Метод сіток для розв'язання диференціального рівняння теплопровідності. Явна та неявна схеми скінчено-різницевої апроксимація рівняння. Апроксимація граничних умов<br>Література [1, 3, 5, 6] |
| 8  | Методи розв'язання скінчено-різницевого рівняння теплопровідності, що складене за явною схемою. Стійкість різницевої схеми.<br>Література [1, 3, 5, 6, 8]                                      |
| 9  | Методи розв'язання скінчено-різницевого рівняння теплопровідності, що складене за неявною схемою.<br>Література [2, 3, 7, 8]                                                                   |
| 10 | Скінчено-різницєва апроксимація рівняння збереження енергії для потоку рідкого середовища. Апроксимація перших похідних за схемою "проти потоку"<br>Література [7, 8]                          |
| 11 | Чисельне розв'язання системи рівнянь динаміки в'язкої рідини у змінних «функція току - вихор».<br>Література [7]                                                                               |
| 12 | Чисельне розв'язання системи рівнянь динаміки в'язкої рідини у змінних «складові швидкості - тиск». Метод штучної стисливості.<br>Література [7, 8]                                            |
| 13 | Алгоритм SIMPLE та SIMPLER для чисельного розв'язання системи рівнянь динаміки в'язкої рідини у змінних «складові швидкості - тиск»..<br>Література [1, 4]                                     |
| 14 | Чисельні методи інтерполяції та апроксимації функцій. Метод найменших квадратів для апроксимації функціональної залежності у вигляді поліномів.<br>Література [1, 2, 3, 4, 5, 7]               |
| 15 | Інтерполяція функцій за допомогою кубічного сплайну.<br>Література [1, 2, 3, 4, 5, 7]                                                                                                          |
| 16 | Програмні середовища для моделювання процесів тепломасопереноса. Технологія цифрових двійників для моделювання і керування енергетичних об'єктів і енергоустаткування.<br>Література [5]       |

### Практичні заняття

| № з/п | Назва теми практичного заняття та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на інформаційні джерела)                                                                                                                                                                  |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Побудова в програмі EXCEL алгоритму розв'язання нелінійних та трансцендентних рівнянь методом хорд та методом дотичних. Складання розрахункового алгоритму для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь методами простої ітерації та методом Зейделя.<br>Література [1, 2, 3, 4, 5] |
| 2     | Знаходження чисельних значень перших і других похідних від функцій, що задані аналітично та у вигляді таблиці<br>Література [1, 2, 3, 4, 5, 6]                                                                                                                                              |
| 3     | Складання в програмі EXCEL алгоритму чисельного розв'язання звичайних                                                                                                                                                                                                                       |



|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | диференціальних рівнянь першого порядку методом Ейлера та методом Рунге-Кутта. Побудова схеми чисельного розв'язання диференціальних рівнянь другого і третього порядків. Застосування методу стрільби для чисельного розв'язання рівняння Блазіуса. Література [2, 3, 5, 6]                                                                                                                                                                                                                                 |
| 4 | Побудова прямокутної різницевої сітки та складання скінчено-різницевої апроксимації рівняння теплопровідності за явною та неявною схемами. Чисельне розв'язання рівняння теплопровідності з заданими граничними умовами за явною часовою схемою. Визначення кроку за часом, що забезпечує стійкість різницевої схеми. Розрахунок коефіцієнтів для методу прогонки, що застосовується для розв'язання складеного за неявною схемою скінчено-різницевого рівняння теплопровідності. Література [4, 5, 6, 7, 8] |
| 5 | Складання чисельного алгоритму для розв'язання скінчено-різницевого рівняння збереження енергії для потоку рідкого середовища. Література [7, 8]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 6 | Побудова алгоритму розв'язання рівняння перенесення вихору за неявною схемою апроксимації. Складання алгоритму для розрахунку коефіцієнтів різницевих рівнянь перенесення імпульсу. Література [7, 8]                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 7 | Застосування методу найменших квадратів для апроксимації функцій, заданих у вигляді таблиці, квадратичною параболою. Розрахунок коефіцієнтів для інтерполяції функцій кубічним сплайном. Література [1, 2]                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

## 6. Самостійна робота аспіранта

| №з/п | Вид самостійної роботи          | Кількість годин СРС |
|------|---------------------------------|---------------------|
| 1    | Підготовка до аудиторних занять | 66                  |
| 3    | Підготовка до екзамену          | 24                  |

## Політика та контроль

### 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- відвідування лекцій та практичних занять
- активність на практичних та лекційних заняттях, регулярна самостійна робота
- дотримання стандартів академічної доброчесності.
- Відвідування лекцій та практичних занять, а також відсутність на них, не оцінюється. Однак, аспірантам рекомендується відвідувати усі види занять (як лекцій, так і практичних занять);
- Moodle та інші інтернет ресурси, що надає викладач, тощо.

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

**Поточний контроль:** експрес-опитування, робота на практичних заняттях.

**Календарний контроль:** провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

**Семестровий контроль:** екзамен

Умови допуску до семестрового контролю: семестровий рейтинг більше 30 балів.

Загальна рейтингова оцінка аспіранта після завершення семестру складається з балів, отриманих за:

- відповіді під час проведення експрес-опитувань на лекціях;
- роботу на практичних заняттях;
- написання екзамену.

| <i>Робота на лекційних заняттях</i> | <i>Робота на практичних заняттях</i> | <i>R<sub>c</sub></i> | <i>R<sub>екз</sub></i> | <i>R</i> |
|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------|----------|
| 18                                  | 42                                   | 60                   | 40                     | 100      |

1. Рейтинг аспіранта розраховується виходячи із 100-бальної шкали, з них 60 балів складає стартова шкала. Стартовий рейтинг (протягом семестру) складається з балів, що аспірант отримує за:

- експрес-контролі на лекційних заняттях;
- роботу на практичних заняттях (7 занять).

2. Критерії нарахування балів:

2.1. Експрес-контролі на лекційних заняттях оцінюються в 3 бали кожний. Максимальна кількість балів за експрес-контролі – 3 бали \* 6 експрес-контролів = 18 балів.

Експрес-контроль проводиться у вигляді усного опитування аспірантів безпосередньо на лекційному занятті. Необхідно дати відповідь на одне запитання. Правильна відповідь оцінюється в 3 бали.

2.2. Практичне заняття оцінюється в 6 балів:

- активна творча робота – 5-6 балів;
- плідна робота – 2-4 балів;
- пасивна робота – 0-1 бали.

3. Умовою допуску до екзамену є рейтинг не менше 30 балів.

4. На екзамені студенти виконують письмову контрольну роботу. Кожне завдання містить два теоретичних запитання (завдання) і одне практичне. Кожне теоретичне запитання (завдання) оцінюється у 10 балів, а практичне у 20 балів за такими критеріями:

- «відмінно», повна відповідь, не менше 90% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь», (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – 9-10; 18-20 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь, не менше 75% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь або є незначні неточності (повне розв'язування завдання з незначними неточностями) – 7-8; 16-17 балів;
- «задовільно», неповна відповідь, не менше 60% потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – 4-6; 10-15 балів;
- «незадовільно», відповідь не відповідає умовам до «задовільно» – 0 балів.

5. Сума стартових балів та балів за екзаменаційну контрольну роботу переводиться до екзаменаційної оцінки згідно з таблицею:

| <i>Кількість балів</i>    | <i>Оцінка</i> |
|---------------------------|---------------|
| 100-95                    | Відмінно      |
| 94-85                     | Дуже добре    |
| 84-75                     | Добре         |
| 74-65                     | Задовільно    |
| 64-60                     | Достатньо     |
| Менше 60                  | Незадовільно  |
| Не виконані умови допуску | Не допущено   |

#### **9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

- *за участь в науково-дослідній роботі із виступом на конференції – 10 заохочувальних балів, які додаються до загальної суми, якщо вона менша 100 балів;*
- *за проєкт тез по проблематиці дисципліни – 10 заохочувальних балів, за проєкт наукової статті – 20 балів.*

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

**Складено**



**доктор технічних наук, ст. наук. співр**

**Б.В. Давиденко**

**Ухвалено** Вченою радою ІТТФ НАН України (протокол № 7 від 11 квітня 2024 р.)