



Математичне моделювання процесів конвективного і променевого теплообміну

Робоча програма навчальної дисципліни (силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>14 Електрична інженерія</i>
Спеціальність	<i>142 Енергетичне машинобудування</i>
Освітня програма	<i>Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем</i>
Статус дисципліни	<i>вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>IV курс, весняний</i>
Об'єм дисципліни	<i>4 кредити ЄКТС (120 годин), 36 години лекцій, 9 годин практичні заняття, 75 годин самостійна робота</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>залік/ модульна контрольна робота</i>
Розклад занять	http://roz.kpi.ua/
Мова викладання	<i>українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н., доцентка, Лебедь Наталія Леонідівна, nata.lebeddom@gmail.com Практичні заняття: к.т.н., доцентка, Лебедь Наталія Леонідівна, nata.lebeddom@gmail.com
Розміщення курсу	https://campus.kpi.ua , https://drive.google.com/drive/u/2/folders/1qv11D6vqvivE3j4DN5Y865CAmB49lovW , https://do.ipk.kpi.ua/

Програма навчальної дисципліни

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

Предмет навчальної дисципліни

чисельні методи розв'язку математичних моделей
конвективного і променевого теплообміну в елементах енергетичного обладнання

При проектуванні і експлуатації енергетичного обладнання необхідно знати умови розвитку процесів, які протікають в ньому. У цьому випадку, в наслідок складності постановки і проведення фізичного експерименту, використовується обчислювальний експеримент, в основі якого лежить математичне моделювання. Тому в останній час обчислювальний експеримент займає домінуюче положення при виконанні досліджень, проектуванні і управлінні складними процесами і явищами. Знання основних принципів і методів розв'язку математичних моделей теплових процесів дозволить фахівцю вирішувати складні інженерні задачі.

Метою навчальної дисципліни є формування здатностей (компетентностей), які студент набуде після вивчення дисципліни:

Здатність забезпечувати моделювання об'єктів і процесів з використанням стандартних і спеціальних пакетів програм та засобів автоматизації інженерних розрахунків, проводити експерименти за заданими методиками з обробкою й аналізом результатів

ФК 10

Здатність брати участь у роботі над інноваційними проектами, використовуючи методи дослідницької діяльності.

ФК 12

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі програмні результати навчання:

Застосовувати інженерні технології, процеси, системи і обладнання відповідно до спеціальності 142 Енергетичне машинобудування; обирати і застосовувати придатні типові аналітичні, розрахункові та експериментальні методи; правильно інтерпретувати результати таких досліджень

ПРН 04

Використовувати наукові бази даних та інші відповідні джерела інформації, здійснювати моделювання з метою детального вивчення і дослідження інженерних питань принаймні в одному з напрямів енергетичного машинобудування. ПРН 08
Розуміння застосовуваних методик проектування і досліджень у сфері енергетичного машинобудування, а також їх обмежень ПРН 11

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

Пререквізити: Вища математика, Теорія теплообміну, Гідрогазодинаміка, Теплообмін при фазових перетвореннях і випромінюванні.

Постреквізити: дипломне проектування, дисципліни, які пов'язані з процедурами моделювання процесів в енергетичному обладнанні.

3. Зміст навчальної дисципліни

РОЗДІЛ 1 Математичне моделювання і розв'язання задач теплообміну

Тема 1.1 Сутність моделювання теплофізичних процесів

Тема 1.2 Загальні принципи і поняття математичного моделювання

Тема 1.3 Характеристика і класифікація математичних моделей процесів теплообміну

РОЗДІЛ 2 Моделювання процесів конвективного теплообміну в умовах ламінарного руху потоку в трубах

Тема 2.1 Математичний опис процесу конвективного теплообміну в умовах ламінарної течії середовища у каналах

Тема 2.2 Визначення температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі

Тема 2.3 Визначення розподілу по довжині каналу коефіцієнта тепловіддачі від стінки до ламінарного потоку середовища

РОЗДІЛ 3 Моделювання задач теплообміну випромінюванням

Тема 3.1 Загальні відомості про процес теплообміну випромінюванням

Тема 3.2 Моделювання процесу променевого теплообміну в системі довільно розташованих тіл

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова (підручники, навчальні посібники) література.

1. В.К.Щербаков Математичне моделювання теплофізичних процесів : підручник для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика» / Щербаков В. К., Лебедь Н. Л. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 342 с.

Додаткова (монографії, статті, документи, електронні ресурси) література.

1. С.М. Константинов Теплообмін: Підручник. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка»: Інтерс, 2005. – 304с.: іл. http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2015/Konstantinov_2005_304.pdf
2. Є.В.Шевель, М.В.Воробйов «Теплообмін випромінюванням» [Текст]: Навчальний посібник з дисципліни «Теплообмін при фазових перетворюваннях і випромінюванні» [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів які навчаються за спеціальностями 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика / Є.В. Шевель, М.В. Воробйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,45 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 42 с.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

При вивченні дисципліни використовуються репродуктивний, евристичний, дослідницький методи навчання та метод проблемного викладення.

Згідно навчального плану для опанування матеріалу дисципліни передбачено лекційні заняття

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
-------	--

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
РОЗДІЛ 1 Моделювання температурних режимів вузлів та деталей технічних пристроїв	
1.	Вступ Тема 1.1. Сутність моделювання теплофізичних процесів Тема 1.2 Загальні принципи і поняття математичного моделювання Лекція 1. Предмет і мета дисципліни. Місце дисципліни у підготовці інженерів-енергетиків. База дисципліни. Сучасні методи дослідження теплофізичних процесів. Обчислювальний експеримент – метод чисельного аналізу складних фізичних процесів. Обчислювальний експеримент у теплофізиці. <i>Література:</i> (1), стор. 7–24
2.	Тема 1.3 Характеристика і класифікація математичних моделей процесів теплообміну Лекція 2. Моделювання та математичні моделі. Методи послідовного моделювання складних технічних об'єктів і фізичних процесів, які протікають в них (від спрощених моделей до більш досконалих і точних). Класифікація задач інженерної теплофізики. Структурна схема математичного моделювання і чисельного розв'язку моделей тепломасопереносу з використанням сучасних ЕОМ. <i>Література:</i> (1), стор. 24-34
РОЗДІЛ 2 Моделювання процесів конвективного теплообміну при ламінарній течії потоку в трубах	
3.	Тема 2.1 Моделювання процесів конвективного теплообміну в умовах ламінарного руху потоку в трубах Лекція 3. Диференціальні рівняння конвективного теплообміну. Фізичний зміст системи ДР конвективного теплообміну без урахування стиснення середовища та дисипації у ньому кінетичної енергії, ДР тепловіддачі, ДР енергії та Нав'є-Стокса. <i>Література:</i> (1), стор. 159–174 СРС: Основні поняття конвективного теплообміну. Фізичний зміст ДР суцільності
4.	Лекція 4. Фізичний зміст диференціальних рівнянь конвективного теплообміну в потоці середовища. Фізичний зміст диференціального рівняння енергії. Фізичний зміст диференціального рівняння руху <i>Література:</i> (1), стор. 174–185 СРС: Межі застосування ДР конвективного теплообміну для ньютонівських рідин за числами Маха та Рейнольдса.
5.	Лекція 5. Фізичний зміст диференціального рівняння руху. Фізичний зміст диференціального рівняння нерозривності (суцільності середовища). Постановка основної задачі конвективного теплообміну в умовах ламінарної течії потоку середовища у трубі постійного перерізу. <i>Література:</i> (1), стор. 184-194, СРС: Система ДР конвективного теплообміну.
6.	Тема 2.2 Визначення температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі Лекція 6. Фізична постановка задачі конвективного теплообміну при русі середовища у трубі. Приведення системи ДР конвективного теплообміну до умов фізичної постановки задачі. Математична модель температурного поля потоку середовища у трубі (ММ1) відповідно до умов прийнятої фізичної постановки задачі. <i>Література:</i> (1), стор. 193–203 СРС: Порядок розв'язання математичної моделі температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі.
7.	Лекція 7. Аналітичне розв'язання гідродинамічної задачі для ламінарного потоку середовища у трубі. Приведення диференціального рівняння руху до тотожно–одночленного вигляду. Інтегрування диференціального рівняння руху. Визначення похідної зміни тиску за напрямом руху потоку середовища у трубі. <i>Література:</i> (1), стор. 203–209 СРС: Аналіз отриманого рішення ДР руху Нав'є-Стокса.
8.	Лекція 8. Визначення температурного поля ламінарного потоку в трубі за відомого розподілу швидкості середовища. Теплова задача. Складання розрахункової схеми математичної моделі температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі. <i>Література:</i> (1), стор. 209–214

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	СРС: ММ температурного поля ламінарного потоку в трубі за відомого розподілу швидкості середовища.
9.	Лекція 9. Отримання розрахункових рівнянь теплових балансів внутрішніх елементів сітки розбивки області розв'язання задачі. Представлення отриманого рівняння у канонічному виді. Отримання розрахункових рівнянь теплових балансів граничних елементів, прилеглих до осі труби. Представлення отриманого рівняння у канонічному виді. Отримання розрахункових рівнянь теплових балансів граничних елементів, прилеглих до внутрішньої поверхні стінки труби. Представлення отриманого рівняння у канонічному виді. Отримання розрахункових рівнянь теплових балансів вхідних граничних елементів. <i>Література:</i> (1), стор. 214–230 СРС: Аналіз ММ температурного поля ламінарного потоку в трубі за відомого розподілу швидкості середовища.
10.	Лекція 10. Розрахунково–різницева схема РС–1 математичної моделі для визначення сіткового поля температур. Розв'язання розрахункової схеми математичної моделі температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі. <i>Література:</i> (1), стор. 230–240 СРС: Аналіз стійкості розв'язку розрахункової схеми РС–3 математичної моделі
	Тема 2.3 Визначення розподілу по довжині каналу коефіцієнта тепловіддачі від стінки до ламінарного потоку середовища Лекція 10 (продовження). Визначення похідної температури по нормалі до теплообмінної поверхні у перерізі. Визначення температури теплообмінної поверхні в перерізі. Визначення середньої температури потоку в перерізі. Причини похибки чисельного розв'язку основної задачі конвективного теплообміну в умовах ламінарного режиму течії стабілізованого потоку середовища у трубі. Постановка спряженої задачі конвективного теплообміну. Аналіз спряжених задач конвективного теплообміну. <i>Література:</i> (1), стор. 244–249 СРС: Підготовка до МКР, частина I. <i>Конспект лекцій.</i>
11.	Лекція 11. Модульна контрольна робота. Частина I
РОЗДІЛ 3 Моделювання задач променевого теплообміну	
	Тема 3.1 Загальні відомості про процес теплообміну випромінюванням Лекція 11 (продовження). Монохроматичний променевий тепловий потік. Інтегральний променевий тепловий потік. Випромінювання сірих тіл. Випромінювання інтегрального потоку в простір. Види променевих теплових потоків, що беруть участь в променевому теплообміні. Зв'язок між ними. Класифікація задач променевого теплообміну у замкненій системі тіл (ЗСТ) та методів їх розв'язку. Види променевих теплових потоків. Постановка задачі променевого теплообміну та методи їх аналітичного та чисельного розв'язку. <i>Література:</i> (1), стор. 257–277 СРС: Механізм променевого теплообміну.
12.	Тема 3.2 Моделювання процесу променевого теплообміну в системі довільно розташованих тіл Лекція 12. Постановка прямої стаціонарної задачі променевого теплообміну. Забезпечення для системи теплообмінних поверхонь умов застосування алгебраїчного методу моделювання задач променевого теплообміну. Математична модель променевого теплообміну в замкненій системі теплообмінних поверхонь відповідно до алгебраїчного методу. Визначення променевого теплового потоку, який падає на поверхню теплообміну «і». Визначення ефективного променевого теплового потоку поверхні теплообміну «і». Визначення результуючого променевого теплового потоку поверхні теплообміну «і». <i>Література:</i> (1), стор. 277–290 СРС: Сутність алгебраїчного методу та умови його застосування до розв'язку задач променевого теплообміну у ЗСТ.
13.	Лекція 13. Розв'язання системи алгебраїчних рівнянь для визначення густини ефективних теплових потоків. Отримання розрахункової схеми системи алгебраїчних рівнянь для визначення густини

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
	ефективних теплових потоків. Вибір методу розв'язання. Аналітичне визначення середніх кутових коефіцієнтів випромінювання між поверхнями F_1 та F_k . Фізичний зміст і аналітичне визначення елементарних, місцевих та середніх кутових коефіцієнтів між поверхнями F_1 та F_k у ЗСТП. <i>Література:</i> (1), стор. 290–299 СРС: Аналіз математичної моделі променевого теплообміну у ЗСТ у матричному виді.
14.	Лекція 14. Чисельне визначення середніх кутових коефіцієнтів випромінювання у замкненій системі теплообмінних поверхонь. Допоміжні операції для виконання чисельного інтегрування кратних інтегралів методом поверхневих елементів. <i>Література:</i> (1), стор. 209–308 СРС: Побудова на основі аналітичного визначення Φ_{ik} методики його чисельного розрахунку на ЕОМ. (10), стор. 261-265
15.	Лекція 15. Визначення величин, які входять у аналітичну формулу для визначення середнього кутового коефіцієнту випромінювання. Реалізація чисельного розв'язання аналітичної формули для визначення середнього кутового коефіцієнта випромінювання. Розрахункова схема розв'язання. <i>Література:</i> (1), стор. 308–320. СРС: Приведення ЗСТ до загальної системи координат. (10), стор. 261-265
16.	Лекція 16. Реалізація чисельного розв'язання аналітичної формули для визначення середнього кутового коефіцієнта випромінювання. Програма визначення параметрів попарного променевого теплообміну поверхонь замкненої системи теплообмінних поверхонь (цикл DO(i)). Програма визначення середніх кутових коефіцієнтів випромінювання між поверхнями. <i>Література:</i> (1), стор. 320–326 СРС: Блок–схема Програма визначення параметрів попарного променевого теплообміну поверхонь замкненої системи теплообмінних поверхонь. Підготовка до МКР, частина II <i>Конспект лекцій.</i>
17.	Лекція 17. Завершення чисельного розв'язання прямої задачі променевого теплообміну в замкненій системі теплообмінних поверхонь. Структурна схема чисельного розв'язання прямої задачі променевого теплообміну в замкненій системі теплообмінних поверхонь. <i>Література:</i> (1), стор. 326–329 Модульна контрольна робота. Частина II
18.	ЗАЛІК

Практичні заняття

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
РОЗДІЛ 2 Моделювання процесів конвективного теплообміну при ламінарній течії потоку в трубах	
1.	Тема 2.1 Моделювання процесів конвективного теплообміну в умовах ламінарного руху потоку в трубах Фізична постановка задачі конвективного теплообміну при ламінарному русі середовища у трубі. Математична модель температурного поля потоку середовища у трубі (ММ1) відповідно до умов прийнятої фізичної постановки задачі. <i>Література:</i> Конспект лекцій СРС: Згідно завдання на РР виконати: фізична модель конвективного теплообміну при ламінарному русі середовища у трубі; математична модель температурного поля потоку середовища у трубі (ММ1) відповідно до умов прийнятої фізичної постановки задачі.
2.	Тема 2.2 Визначення температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі Розрахункова схема математичної моделі температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі. Представлення отриманої системи у канонічному виді. Розрахунково–різницева схема РС–1 математичної моделі для визначення сіткового поля температур. Розв'язання розрахункової схеми математичної моделі температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі.

	<i>Література:</i> Конспект лекцій СРС: Побудова розрахункової схеми математичної моделі, вибір чисельного методу розв'язку різницево-кінцевої схеми.
3.	Тема 2.3 Визначення розподілу по довжині каналу коефіцієнта тепловіддачі від стінки до ламінарного потоку середовища Визначення похідної температури по нормалі до теплообмінної поверхні у перерізі. Визначення температури теплообмінної поверхні в перерізі. Визначення середньої температури потоку в перерізі. Причини похибки чисельного розв'язку основної задачі конвективного теплообміну в умовах ламінарного режиму течії стабілізованого потоку середовища у трубі. <i>Література:</i> Конспект лекцій СРС: Виконання рішення числового методу розв'язку різницево-кінцевої схеми.
4.	Виконання розв'язку математичної моделі технічного пристрою за методом Рунге–Кутта (за допомогою програмного продукту MathCad). Побудова залежностей температури елементів теплової схеми від часу. Аналіз отриманих результатів. <i>Література:</i> Конспект лекцій СРС: Аналіз результатів, оформлення звіту з виконання завдань практичних занять.
5.	ЗАКЛЮЧНЕ ЗАНЯТТЯ. Захист звітів з практичних занять. Обговорення рейтингових балів, набраних студентами за семестр.

6. Самостійна робота студента

Згідно навчального плану для опанування матеріалу дисципліни передбачено виконання певних теоретичних і практичних завдань СРС (видається після лекцій і практичних занять, див. п.5).

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- готовність відповідей при опитуванні;
- активність, підготовка коротких доповідей чи текстів, відключення мобільних телефонів; відповідно до завдання викладача використання засобів зв'язку для пошуку інформації в Інтернеті;
- заохочувальні бали надаються у відповідності до «системи оцінювання результатів навчання», штрафні бали є засобом протидії плагіату та несвоєчасному виконанню завдань;
- політика дедлайнів та перескладань полягає у виконанні поточних модульних робіт, завдань практичних занять і СРС до початку сесії;
- політика щодо академічної доброчесності відповідає загальним положенням, прийнятим у «КПІ ім. Сікорського» (детальніше: <https://kpi.ua/code>);
- політика навчальної дисципліни спрямована на розвиток індивідуальних здібностей в напрямку набуття компетентностей щодо застосування основних принципів і методів математичного моделювання для вирішення складних інженерних задач, а також в напрямку розширення сфер застосування отриманих знань, умінь і досвіду;
- за бажанням студентів, допускається вивчення матеріалу за допомогою онлайн-курсів за тематикою, яка відповідає тематиці конкретних занять.

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

Види контролю знань студента з дисципліни:

- відповіді на лекційних та практичних заняттях;
- виконання розрахункових завдань по практичним заняттям;
- виконання МКР (дві частини);
- календарний контроль (проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог PCO);
- відповідь на заліку.

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

- 1) чотири відповіді в середньому кожного студента на лекційних і практичних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 2 студенти; при середній чисельності групи 10 осіб, двадцять дві лекції: $2 \cdot 22 / 10 \approx 4$ відповіді);
- 2) виконання завдань СРС (теоретичні і практичні);
- 3) виконання однієї МКР;

4) *відповідь на заліку при виконанні умов допуску і бажанні студента підвищити оцінку.*

За результатами навчальної роботи за перші 6 тижнів «ідеальний студент» має набрати 27 балів. На першій атестації (7-й тиждень) студент отримує «атестовано», якщо його поточний рейтинг не менше 13 балів.

За результатами 12 тижнів навчання «ідеальний студент» має набрати 48 балів. На другій атестації (13-й тиждень) студент отримує «атестовано», якщо його поточний рейтинг не менше 24.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Робота на заняттях

Ваговий бал — 5. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях: $r_1 = 5 \text{ балів} \times 4 = 20 \text{ балів}$.

Критерії оцінювання:

5 балів — повна вірна відповідь на поставлене запитання; **4 бали** — відповідь має несуттєві помилки; **3 бали** — неповна відповідь; **2 бали** — наявність несуттєвих помилок в неповній відповіді, **1 бал** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді, **0 балів** — відсутність відповіді.

2. Виконання СРС

Лекційні заняття

Ваговий бал — 2. Максимальна кількість балів студента за десять завдань (завдання СРС видаються після лекції, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень): $r_2 = 2 \text{ бали} \times 10 = 20 \text{ балів}$. Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

2 бали — в повному об'ємі і вчасно надане завдання; **1...0 балів** — не вчасно надане завдання.

Штрафні бали:

— несвоєчасне представлення виконаного завдання СРС без поважної причини (хвороба) — **1 бал**.

Практичні заняття

Максимальна кількість балів за виконання завдань практичних занять 35 балів і за захист 5 балів, тобто сумарна кількість балів дорівнює $r_3 = 40$. Завдання для виконання видається студенту на початку семестру, строк захисту – останнє практичне заняття. Оформлення звіту згідно вимогам ДСТУ 8302:2015. Захист розрахункової роботи на останньому практичному занятті. Виконання завдань і захист є обов'язковим.

Критерії оцінювання (виконання завдань):

35 балів — повне виконання завдання, відповідність вимогам щодо оформлення; **28...34 бали** — повне виконання завдання, незначна невідповідність вимогам щодо оформлення; **21...27 балів** — виконання завдання з деякими незначними неточностями, відповідність вимогам щодо оформлення; **10...20 балів** — виконання завдання з деякими неточностями, незначна невідповідність вимогам щодо оформлення; **0...9 балів** — виконання завдання з грубими помилками, невідповідність вимогам щодо оформлення – робота не зарахована, потребує доопрацювання.

Критерії оцінювання (захист звіту):

5 балів — повна вірна відповідь на поставлені запитання; **4 бали** — відповідь має несуттєві похибки; **3 бал** — неповна відповідь; **2 бали** — наявність несуттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, **0...1 бали** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, захист не зараховано

Штрафні бали:

— несвоєчасне представлення та/або захист звіту без поважної причини (хвороба) — **1 бал**.

Заохочувальні бали

— участь у наукових та/або науково-практичних конференціях, семінарах, симпозіумах — **5 балів** (при умові виконання завдань розрахункової роботи).

3. Модульна контрольна робота (МКР)

Проводиться дві частини МКР. Ваговий бал кожної частини — 10. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює $r_4 = 2 \times 10 = 20 \text{ балів}$.

Критерії оцінювання:

10 балів — повна вірна відповідь на завдання; **8..9 бали** — відповідь має несуттєві помилки; **5..7 бали** — неповна відповідь; **3..4 бали** — неповна відповідь з несуттєвими недоліками; **0...2 балів** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, МКР не зараховано.

4. Залік

Залік проводиться у письмово-усній формі. Залікова робота складається з двох теоретичних питань (по 10 балів) і одного теоретичного питання (20 балів). Тобто, максимальна кількість балів за виконану залікову роботу: **10+10+20 = 40 балів**.

Критерії оцінювання:

Кожне питання залікової роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

- повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – **10 (19...20) балів**;
- достатньо повна відповідь (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – **8...9 (14...18) балів**;
- неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – **4...7 (11...13) балів**;
- незадовільна відповідь (менше 60% потрібної інформації та помилки) – менше **3 (10) балів**.

В умовах дистанційного навчання (проведення заліку онлайн) залікова робота складається з тестів (залік проводиться в усій формі): вісім теоретичних питань, які оцінюються по 5 балів кожне: **8·5 = 40 балів**.

Критерії оцінювання:

- повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – **5 балів**;
- достатньо повна відповідь (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – **4...3 бали**;
- неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації та деякі помилки) – **2...1 балів**;
- незадовільна відповідь (менше 60% потрібної інформації та помилки) – **0 балів**.

Штрафні бали:

- додаткове питання з тем лекційного курсу та практичних занять отримують студенти, які не брали участі у роботі певного заняття. Незадовільна відповідь з додаткового питання знижує загальну оцінку на **3 бали**.

Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни (R_D):

Сума вагових балів контрольних заходів в семестрі (стартовий рейтинг) складає:

$$R_C = r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

де r_i — рейтингові або вагові бали за кожний вид робіт з дисципліни.

Максимально можливий стартовий рейтинг: $R_C = 20+20+40+20 = 100$ балів.

Необхідною умовою допуску до заліку є позитивна оцінка з виконання всіх завдань СРС та стартовий рейтинг не менше $0,25 \times R_C = 25$ балів.

Якщо в продовж семестру студент отримав більше 60 балів, він має право отримати оцінку «автоматом» згідно таблиці відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою (див. нижче). Найвища оцінка «автоматом» не виставляється.

Студенти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж 25 балів або не виконали умов допуску на залік, зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до заліку з цієї дисципліни і мають академічну заборгованість.

Застосовується «м'яка» РСО. Залікову роботу виконують студенти, які бажають підвищити свою оцінку, та студенти, які набрали менше 60 балів за семестр та виконали умови допуску на залік. Набрана студентом за семестр кількість балів анулюється. Остаточна оцінка по дисципліні розраховується як добуток балів за виконання залікової роботи на коефіцієнт перерахунку: $R_3 = 40 \times 2,5 = 100$ балів. Кількість балів при здачі заліку за рейтинговою шкалою з дисципліни переводиться у залікову оцінку згідно таблиці відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою. Здобувач отримує більшу з оцінок, що отримані за результатами залікової контрольної роботи або за рейтингом.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою

Кількість балів	Оцінка
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

Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають право і можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами (детальніше: https://osvita.kpi.ua/2020_7-170, https://document.kpi.ua/files/2020_7-170.pdf).

Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано, пояснивши з яким критерієм не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень.

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (детальніше: [https:// kpi.ua/code](https://kpi.ua/code)).

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

1. Дистанційне навчання:

В умовах дистанційного режиму організація освітнього процесу здійснюється з використанням технологій дистанційного навчання: платформи дистанційного навчання «Сікорський» та «Електронний кампус». Навчальний процес у дистанційному режимі здійснюється відповідно до затвердженого розкладу навчальних занять. Заняття проходять з використанням сучасних ресурсів проведення онлайн-зустрічей (організація відео-конференцій на платформі Zoom).

2. Навчання в умовах правового режиму воєнного стану:

- передбачає проведення усіх видів занять дистанційно (з використанням синхронної або асинхронної моделі освітньої взаємодії), у відповідності до Регламенту організації освітнього процесу в дистанційному режимі та Положення про дистанційне навчання в КПІ ім. Ігоря Сікорського;
- кінцеві терміни виконання індивідуальних завдань і завдань самостійної роботи переносяться на кінець семестру (з обов'язковим виконанням і захистом);
- у рейтингову систему оцінювання вносяться зміни стосовно нарахування штрафних балів за не своєчасне виконання завдань: штрафні бали не нараховуються.

3. Для студентів існує можливість зарахування (у вигляді додаткових балів до рейтингу до 20 балів):

- сертифікатів проходження дистанційних чи онлайн курсів за тематикою дисципліни;
- сертифікатів, які підтверджують участь у науково-практичних і наукових конференціях за тематикою дисципліни;
- публікація статті у науковому журналі за тематикою дисципліни.

Додаток 1

Список тем, які виносяться на модульну контрольну роботу

№ з/п	Назва теми , яка виноситься на контрольну роботу
Модульна контрольна робота. Частина I	
1.	Математичний опис процесу конвективного теплообміну в умовах ламінарної течії середовища у каналах
2.	Визначення температурного поля ламінарного потоку середовища у трубі
3.	Визначення розподілу по довжині каналу коефіцієнта тепловіддачі від стінки до ламінарного потоку середовища
Модульна контрольна робота. Частина II	
1.	Загальні відомості про процес теплообміну випромінюванням
2.	Моделювання процесу променевого теплообміну в системі довільно розташованих тіл
3.	Врахування променевого теплообміну для розв'язання задач температурного режиму технічних пристроїв

Додаток 2

Список теоретичних питань до залікової роботи

1. Основний закон конвективного теплообміну. Величини, що входять в рівняння закону, їх фізичний зміст. Основне завдання конвективного теплообміну. Диференціальна та інтегральна форма закону Ньютона-Рихмана. Отримання диференціального рівняння тепловіддачі. Величини, що входять в рівняння, їх фізичний зміст.
2. Диференціальне рівняння енергії потоку середовища (в операторному виді і в частинних похідних). Обмеження в застосуванні диференціального рівняння енергії потоку середовища. Фізичний зміст диференціального рівняння енергії потоку середовища (доказ). Обмеження в застосуванні диференціального рівняння енергії потоку середовища.

3. Диференціальне рівняння руху Нав'є-Стокса. Обмеження в застосуванні диференціального рівняння руху Нав'є-Стокса. Фізичний зміст диференціального рівняння руху Нав'є-Стокса (доказ).
4. Диференціальне рівняння руху для неізотермічного потоку середовища в наближенні Буссінеска.
5. Диференціальне рівняння нерозривності в операторно-векторному виді і в частинних похідних. Диференціальне рівняння нерозривності для стаціонарного руху. Фізичний зміст.
6. Фізична постановка стаціонарної задачі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі при теплових граничних умовах I-го та II-го роду. Прийняті допущення.
7. Перетворення диференціального рівняння енергії згідно умов стаціонарної задачі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі при симетричних теплових граничних умовах.
8. Перетворення диференціального рівняння руху згідно умов стаціонарної задачі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі.
9. Математична модель стаціонарної задачі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі при симетричних теплових і гідродинамічних граничних умовах. Отримання замикаючого рівняння.
10. Аналітичне розв'язання гідродинамічної задачі математичної моделі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі при симетричних граничних умовах.
11. Розрахункове рівняння теплових балансів внутрішніх елементів сітки розбивки області розв'язання стаціонарної задачі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі (вивід).
12. Розрахункове рівняння теплових балансів граничних елементів на осі труби сітки розбивки області розв'язання стаціонарної задачі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі (вивід).
13. Розрахункове рівняння теплових балансів елементів сітки розбивки, прилеглих до стінки труби, області розв'язання стаціонарної задачі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі (вивід).
14. Розрахункова схема математичної моделі температурного поля ламінарного потоку в трубі при симетричних граничних умовах і відомому розподілі швидкості ламінарного потоку в трубі. Розрахункова схема в канонічному і в матричному виді. Вибір методу розв'язання матричного рівняння.
15. Застосування методу прогонки для розв'язання розрахункової схеми математичної моделі температурного поля ламінарного потоку в трубі при симетричних теплових граничних умовах і відомому розподілі швидкості ламінарного потоку в трубі. Хід розв'язання розрахункової схеми методу прогонки. Доказ стійкості розв'язання по розрахунковій схемі.
16. Чисельне визначення середнього по перерізу коефіцієнта тепловіддачі при відомому розподілі швидкостей і температур потоку середовища в трубі при ламінарному режимі руху (чисельний розв'язок).
17. Причини похибки чисельного розв'язання стаціонарної задачі конвективного теплообміну при ламінарній течії середовища в трубі. Сутність постановки спряженої задачі конвективного теплообміну та її математична модель.
18. Механізм променевого теплообміну. Монохроматичний променевий тепловий потік. Інтегральний променевий тепловий потік. Випромінювання сірих тіл. Випромінювання інтегрального потоку в простір.
19. Механізм променевого теплообміну. Види променевих теплових потоків, що беруть участь в променевому теплообміні. Зв'язок між ними.
20. Визначення замкненої системи теплообмінних поверхонь і її замикаючих поверхонь. Постановка прямої задачі променевого теплообміну в замкненій системі теплообмінних поверхонь. Підготовка системи тіл до умов алгебраїчного методу.

21. Отримання математичної моделі променевого теплообміну в замкненій системі теплообмінних поверхонь згідно алгебраїчного метода. Приведення основного рівняння математичної задачі до матричного виду. Вибір методу розв'язання матричного рівняння.
22. Фізичний зміст та аналітичне визначення елементарних, місцевих та середніх кутових коефіцієнтів випромінювання між двома теплообмінними поверхнями замкненої системи теплообмінних поверхонь.
23. Підготовчі операції в замкненій системі теплообмінних поверхонь для чисельного визначення попарно-сполучених середніх кутових коефіцієнтів випромінювання i між поверхнями F_i і F_k (загальна система координат, власна система координат, розбивка поверхонь).
24. Підготовчі операції в замкненій системі теплообмінних поверхонь для чисельного визначення попарно-сполучених середніх кутових коефіцієнтів випромінювання між поверхнями F_i і F_k (переведення в загальну систему координат центрів площадок ΔF_i і ΔF_k).
25. Отримання нормальних (в косинусах направляючих кутів) рівнянь поверхонь F_i і F_k , що приймають участь в променевому теплообміні, в загальній координатній системі замкненої системи теплообмінних поверхонь.
26. Отримання рівняння (в косинусах направляючих кутів) для прямої, що з'єднує центри елементарних площин ΔF_i і ΔF_k , які приймають участь у променевому теплообміні, в загальній координатній системі замкненої системи теплообмінних поверхонь. Визначення відстані між центрами площин ΔF_i і ΔF_k .
27. Отримання розрахункових формул для величин, що входять в аналітичний вираз середніх кутових коефіцієнтів випромінювання i між поверхнями F_i і F_k (визначення i)
28. Порядок чисельного інтегрування формули для визначення середніх кутових коефіцієнтів випромінювання між поверхнями F_i і F_k (цикл DO (i) і DO (k)).
29. Порядок чисельного інтегрування формули для визначення середніх кутових коефіцієнтів випромінювання між поверхнями F_i і F_k (цикл DO (M) і DO (N)).

Додаток 3

Варіанти для виконання СРС по практичним заняттям

Номер варіанту	рідина	$T_0, ^\circ\text{C}$	P_0 , атм	z , м	$D_{\text{вн}}$, мм	Re	ГУ
1	повітря	20	1	1,5	20	1100	I
2	повітря	15	1	1,8	25	900	II
3	повітря	25	1	2,3	26	950	I
4	повітря	10	1	2,1	28	800	II
5	повітря	30	1	1,1	27	850	I
6	повітря	20	1	1,2	30	920	II
7	повітря	15	1	1,9	20	820	I
8	повітря	25	1	2,5	25	1100	II
9	повітря	10	1	2,8	26	900	I
10	повітря	30	1	2,1	28	950	II
11	повітря	20	1	2,0	27	800	I
12	повітря	15	1	2,7	30	850	II
13	вода	25	1	1,8	20	920	I
14	вода	10	1	2,3	25	820	II
15	вода	30	1	2,1	26	1100	I
16	вода	20	1	1,1	28	900	II
17	вода	15	1	1,2	27	950	I
18	вода	25	1	1,9	30	800	II
19	вода	10	1	2,5	20	850	I
20	вода	30	1	2,8	25	920	II
21	вода	20	1	2,1	26	820	I

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено к.т.н., доценткою, Лебедь Наталією Леонідівною

Ухвалено: кафедрою АЕ (протокол № 26 від 23.06. 2025 р.)

Погоджено: Методичною комісією НН ІАТЕ (протокол № 9 від 27. 06. 2025 р.)