



Теорія теплообміну

Робоча програма кредитного модуля (Силабус)

Входить до освітнього компоненту Тепломасообмін

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>14 Електрична інженерія</i>
Спеціальність	<i>144 Теплоенергетика</i>
Освітня програма	<i>ОПП Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій</i>
Статус дисципліни	<i>Нормативна</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>2 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>6 кредитів 180 годи</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен</i>
Розклад занять	<i>Лекційні заняття – три рази на два тижні; практичні заняття – один раз на тиждень</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: укр.мова - к.т.н, доц. Фуртат Ірина Едуардівна, i.e.furtat@gmail.com Практичні: к.т.н, доц. Фуртат Ірина Едуардівна, i.e.furtat@gmail.com
Розміщення курсу	<i>https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&show&irid=218281</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Предметом освітнього компоненту «Тепломасообмін» є фізична сутність та закономірності процесів тепломасообміну стосовно до задач теплоенергетики. В зв'язку з цим необхідним і вмотивованим **предметом** кредитного модуля «Теорія тепломасообміну» є вивчення основ теорії і методів розрахунку процесів теплопровідності в твердих тілах, конвективного теплообміну в однофазному середовищі.

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

- ЗКЗ Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.
- ЗК4 Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- ЗК6 Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.
- ЗК9 Здатність приймати обґрунтовані рішення
- ФК1 Здатність застосовувати відповідні кількісні математичні, наукові і технічні методи і комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення інженерних завдань в теплоенергетичній галузі.
- ФК2 Здатність застосовувати і інтегрувати знання і розуміння інших інженерних дисциплін.
- ФК4 Здатність виявляти, класифікувати і оцінювати ефективність систем і

компонентів на основі використання аналітичних методів і методів моделювання в теплоенергетичній галузі

- ФК 7 Здатність враховувати ширший міждисциплінарний інженерний контекст у професійній діяльності в сфері теплоенергетики.
- ФК 8 Здатність використовувати наукову і технічну літературу та інші джерела інформації у професійній діяльності в теплоенергетичній галузі.
- ФК 13 Здатність аналізувати методи та засоби підвищення теплової економічності устаткування об'єктів промислової та муніципальної теплоенергетики; визначати шляхи модернізації теплової схеми з метою підвищення економічності та надійності роботи об'єктів промислової та муніципальної теплоенергетики.

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

- ПРН 1 Знати і розуміти математику, фізику, хімію, екологію, економіку на рівні, необхідному для досягнення результатів освітньої програми.
- ПРН 2 Знати і розуміти інженерні науки, що лежать в основі спеціальності «Теплоенергетика» відповідної спеціалізації, на рівні, необхідному для досягнення інших результатів освітньої програми, в тому числі певна обізнаність в останніх досягненнях науки і техніки у сфері теплоенергетики.
- ПРН 3 Розуміння міждисциплінарного контексту спеціальності «Теплоенергетика».
- ПРН 5 Обирати і застосовувати придатні типові аналітичні, розрахункові та експериментальні методи; правильно інтерпретувати результати таких досліджень.
- ПРН 9 Вміти знаходити необхідну інформацію в технічній літературі, наукових базах даних та інших джерелах інформації, критично оцінювати і аналізувати її.

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

Передумовою вивчення кредитного модуля є засвоєння знань з освітніх компонентів, що викладаються попередньо, а саме: «Вища математика», «Фізика», «Гідрогазодинаміка», «Технічна термодинаміка», «Інформаційні технології», «Інженерна та комп'ютерна графіка», «Технічна механіка». В свою чергу знання в області теорії тепломасообміну забезпечують повноцінне сприйняття та вивчення таких наступних професійно-орієнтованих дисциплін навчальних планів: «Теплотехнологічні процеси і установки», «Котельні установки», «Нагнітачі та теплові двигуни», «Теплофікація та теплові мережі», «Використання нетрадиційних джерел енергії», «Турбіни ТЕС та АЕС», «Спецпідання тепломасообміну», тощо. На результатах навчання з даного кредитного модуля базується виконання науково-дослідних робіт, інженерних і дипломних проєктів.

3. Зміст кредитного модуля

Розділ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТЕОРІЇ ТЕПЛОМАСООБМІНУ.

- 1.1. Предмет теорії тепломасообміну.
- 1.2. Кількісні характеристики процесів перенесення теплоти.
- 1.3. Поле температур і температурний градієнт.

Розділ 2. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ.

2.1. Закон теплопровідності Фур'є.

2.2. Математичне формулювання задачі теплопровідності.

Розділ 3. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ.

3.1. Теплопровідність через плоску стінку при відсутності внутрішніх джерел теплоти.

3.2. Теплопровідність через циліндричну стінку при відсутності внутрішніх джерел теплоти.

3.3. Теплопровідність через кульову стінку при відсутності внутрішніх джерел теплоти.

3.4. Теплопровідність із внутрішніми джерелами теплоти.

Розділ 4. ТЕПЛООБМІН ЧЕРЕЗ ОРЕБРЕНІ ПОВЕРХНІ.

4.1. Загальна характеристика методів інтенсифікації теплопередачі.

4.2. Теплопровідність уздовж ребер різного профілю.

4.3. Теплообмін між оребреною поверхнею і оточуючою рідиною.

4.4. Теплопередача через оребрені поверхні.

Розділ 5. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ТА ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.

5.1. Безрозмірний опис фізичних явищ.

5.2. Аналіз процесів теплопровідності методом подібності.

5.3. Умови подібності фізичних явищ.

5.4. Суть фізичного моделювання.

Розділ 6. ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ.

6.1. Загальні положення.

6.2. Охолодження (нагрівання) пластини в середовищі із сталою температурою.

6.3. Охолодження нескінченного циліндра в середовищі із сталою температурою.

6.4. Охолодження кулі в середовищі із сталою температурою.

6.5. Нестационарний процес теплопровідності в тілах кінцевих розмірів.

6.6. Регулярний режим охолодження (нагрівання) тіл.

Розділ 7. НАБЛИЖЕНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ.

7.1. Чисельний метод розв'язку задач стаціонарної теплопровідності.

7.2. Чисельний метод розв'язку задач нестационарної теплопровідності.

7.3. Метод електротеплової аналогії.

Розділ 8. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ.

8.1. Загальна фізична характеристика процесу.

8.2. Аналітичний опис процесів конвективного теплообміну.

Розділ 9. ПОДІБНІСТЬ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ.

9.1. Безрозмірний опис процесів конвективного теплообміну.

9.2. Обробка і узагальнення дослідних даних.

Розділ 10. ТЕПЛОВІДДАЧА ПРИ ЗОВНІШНЬОМУ ОБТІКАННІ ТІЛ.

10.1. Гідродинамічна характеристика процесу при вимушеному русі рідини уздовж плоскої поверхні (пластини).

10.2. Тепловіддача при поздовжньому омиванні пластини.

10.3. Тепловіддача при вимушеному поперечному омиванні труб.

Розділ 11. ТЕПЛОВІДДАЧА ПРИ ВИМУШЕНОМУ РУСІ РІДИНИ В ТРУБАХ.

11.1. Особливості течії і теплообміну в трубах.

11.2. Тепловіддача при течії рідини в трубах круглого поперечного перерізу.

11.3. Тепловіддача в трубах некруглого поперечного перерізу.

Розділ 12. ТЕПЛОВІДДАЧА ПРИ ВІЛЬНОМУ РУСІ РІДИНИ.

12.1. Тепловіддача при вільному русі рідини в необмеженому просторі.

12.2. Теплообмін при вільному русі рідини в обмеженому просторі.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

1. Лабай В. Й. Тепломасообмін : Підручник для ВНЗ. – Львів: Тріада Плюс, 2004. – 260 с.
2. Погорєлов А.І. Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку): Навчальний посібник для вузів. 2-ге видання. – Львів: «Новий Світ-2000», 2004. – 144 с.
3. Чепурний М. М. Тепломасообмін в прикладах і задачах : навчальний посібник / М. М. Чепурний, Н. В. Резидент. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 128 с.
4. Приходько М.А., Герасимов Г.Г. Термодинаміка та теплопередача. Навчальний посібник. - Рівне: НУВГП, 2008.- 250 с
5. Практикум з тепломасообміну. Стаціонарна теплопровідність без внутрішніх джерел теплоти [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика», освітнього ступеня «бакалавр». / Укладач: І.Е. Фуртат, Н.О. Притула; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,8 Мбайт). – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 53 с.
6. Теория тепломассообмена: Учебник для вузов /С.И. Исаев и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 462 с.
7. Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 562 с.
8. Брюханов О.Н., Шевченко С.Н. Тепломассообмен: Учебник. — М.: ИНФРА-М, 2012. — 464 с.
9. Чередниченко В.С. Теплопередача: учеб пособие для вузов. В 2 ч. Ч.1: Основы теории теплопередачи / В.С.Чередниченко, В.А.Сининицын, А.И Алиферов и др.; под ред. В.С.Чередниченко. – 2-е изд., перераб и дополн. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 232 с.
10. Чередниченко В.С. Теплопередача: учеб пособие для вузов. В 2 ч. Ч.2: Упражнения и задачи / В.С.Чередниченко, В.А.Сининицын, А.И Алиферов и др.; под ред. В.С.Чередниченко, А.И Алиферова. – 2-е изд., перераб и дополн. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 379 с.
11. Курс лекций по дисциплине «Теплопередача» [Электронный ресурс] : электрон. курс лекций / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. унт); сост.: В. В. Бирюк, А. И. Довгялло, Д. А. Угланов. - Электрон. текстовые и граф. дан. (2,87 Мбайт). - Самара, 2013. – 175 с.
12. Самарский А.А., Вабищев П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

Допоміжна література

13. Исаченко В.П и др. Теплопередача: Учебник для вузов / В.П.Исаченко, В.А.Осипова., А.С.Сукомел – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
14. Михеев М.А., Михеева И.М., Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
15. Краснощеков Е.А. и Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: “Энергия”, 1980. – 288 с., ил.
16. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 400 с., ил.
17. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. Пер. с англ. – М.: «Энергия», 1977. – 464 с. с ил.
18. Кэйс В.М. Конвективный тепло- и массообмен. Пер. с англ. – М.: “Энергия”, 1972. – 448 с. с ил.
19. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
20. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 592 с., ил.

21. Жуховицкий Д.Л. Сборник задач по теплопередаче: Учебное пособие. – Изд. 2-е – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 83 с.
22. Новиков И.И., Боришанский В.М. Теория подобия в термодинамике и теплопередаче. – МС.: Атомиздат, 1979. – 184 с.

Навчальний контент

5. Методика опанування кредитного модуля

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	Лекція 1 Предмет теорії тепломасообміну. Предмет і метод теорії тепломасообміну. Тепломасообмін як розділ теоретичних основ теплотехніки. Основні способи перенесення теплоти: теплопровідність, конвекція, променистий теплообмін. Тепловіддача. Теплопередача. Теоретичний та експериментальний методи дослідження в тепломасообміні. Кількісні характеристики процесів перенесення теплоти. Вихідні кількісні характеристики: кількість теплоти, тепловий потік, густина теплового потоку, потужність внутрішніх джерел теплоти. Коефіцієнти тепловіддачі і теплопередачі як характеристики інтенсивності переносу теплоти для відповідних процесів теплообміну. Рівняння тепловіддачі Ньютона та рівняння теплопередачі. Рівняння теплового балансу для стаціонарної теплопередачі. Поле температур і температурний градієнт. Поле температур і його властивості, ізотермічна поверхня. Температурний градієнт. Література: [1-3,6,8,13,14].
2	Лекція 2 Закон теплопровідності Фур'є. Зв'язок між полем температур і полем теплових потоків, лінії теплового потоку, закон Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності. Механізм переносу теплоти в металах, діелектриках, напівпровідниках, рідинах та газах. Математичне формулювання задачі теплопровідності. Диференційне рівняння теплопровідності, коефіцієнт температуропровідності. Умови однозначності для процесів теплопровідності; граничні умови першого, другого, третього та четвертого роду. Література: [1-3,6,8,13,14].
3	Лекція 3 Теплопровідність через плоску стінку при відсутності внутрішніх джерел теплоти. Розподіл температур в однорідній стінці при постійному та змінному коефіцієнті теплопровідності; вирази для теплового потоку, коефіцієнта теплопередачі і термічного опору, їх аналіз. Багатошарова плоска стінка. Теплопровідність через циліндричну стінку при відсутності внутрішніх джерел теплоти. Розподіл температур в однорідній циліндричній стінці при постійному та змінному коефіцієнті теплопровідності; вирази для теплового потоку, коефіцієнта теплопередачі і термічного опору, їх аналіз, наближені формули. Багатошарова циліндрична стінка. Критичний діаметр теплової ізоляції труби. Література: [1-3,6,8,13,14,19].
4	Лекція 4 Теплопровідність через кульову стінку при відсутності внутрішніх джерел теплоти. Розподіл температур в кульовій стінці при постійному та змінному коефіцієнті теплопровідності; вирази для теплового потоку, коефіцієнта теплопередачі і термічного опору, їх аналіз. Багатошарова кульова стінка. Теплопровідність із внутрішніми джерелами теплоти. Теплопровідність в однорідній пластині, циліндричному стержні. Література: [1-3,6,8,13,14,19].

5	Лекція 5 Теплопровідність із внутрішніми джерелами теплоти. Теплопровідність в циліндричній стінці при постійному коефіцієнті теплопровідності і рівномірно розподіленими по об'єму внутрішніми джерелами теплоти; вирази для розподілу температури в тілах та густини теплового потоку на їх поверхні. Література: [1-3,6,8,13,14].
6	Лекція 6 Загальна характеристика методів інтенсифікації теплопередачі. Інтенсифікація теплопередачі шляхом збільшення коефіцієнтів тепловіддачі та за рахунок оребрення стінок. Типи ребристих поверхонь. Теплопровідність уздовж ребер різного профілю. Диференціальне рівняння для одновимірного процесу теплопровідності в ребрах; рівняння та функції Бесселя. Література: [1-3,6,8,13,14].
7	Лекція 7 Теплопровідність уздовж ребер різного профілю. Теплопровідність уздовж стержня сталого поперечного перерізу, поздовжнього та радіального ребер прямокутного профілю: розподіл температур по висоті ребра, вирази для теплового потоку та коефіцієнта ефективності ребра. Література: [1-3,6,8,13,14].
8	Лекція 8 Теплообмін між оребреною поверхнею і оточуючою рідиною. Методика визначення теплового потоку, зведений коефіцієнт тепловіддачі; визначення зведеного коефіцієнта тепловіддачі з урахуванням конструктивних особливостей оребрених поверхонь. Теплопередача через оребрені поверхні. Теплопередача через плоску та циліндричну ребристі стінки: рівняння теплопередачі, вирази для коефіцієнта теплопередачі, їх аналіз. Література: [1-3,6,8,13,14].
9	Лекція 9 Безрозмірний опис фізичних явищ. Характеристика розмірних і безрозмірних величин та способи утворення безрозмірних величин. Геометрична подібність, поняття подібності фізичних явищ. Тотожність безрозмірного математичного опису фізичних явищ як ознака подібності цих явищ, рівняння подібності. Зведення математичного опису фізичного явища до безрозмірного вигляду методом масштабних перетворень. Аналіз процесів теплопровідності методом подібності. Зведення диференційного рівняння теплопровідності та умов однозначності до безрозмірного вигляду. Числа і критерії подібності для процесів теплопровідності, їх фізичний зміст; загальний вигляд рівняння подібності для цих процесів. Література: [1-3,6,8,13,14,22].
10	Лекція 10 Умови подібності фізичних явищ. Загальні умови подібності фізичних процесів. Властивості подібних процесів. Суть фізичного моделювання. Фізично однорідне і неоднорідне моделювання. Умови подібності процесів в реальному об'єкті і його моделі. Література: [1-3,6,8,12,13,14,22].

11	Лекція 11 Загальні положення. Процеси теплопровідності, що проходять у напрямку теплової рівноваги та пов'язані з періодичною зміною теплового стану тіла. Характер зміни температури у часі при охолодженні і нагріванні тіла. Охолодження (нагрівання) пластини в середовищі із сталою температурою. Аналітичний розв'язок задачі, безрозмірне рівняння температурного поля та його аналіз. Визначення кількості теплоти, що віддається тілом у процесі охолодження або акумулюється тілом у процесі нагрівання. Література: [1-3,6,8,13,14,19].
12	Лекція 12 Охолодження нескінченного циліндра в середовищі із сталою температурою. Формулювання задачі нестационарної теплопровідності в нескінченному циліндрі. Формули для розподілу температури в циліндрі та кількості теплоти, якою обмінюється циліндр з навколишнім середовищем. Література: [1-3,6,8,13,14,19].
13	Лекція 13 Охолодження кулі в середовищі із сталою температурою. Формулювання задачі нестационарної теплопровідності в кулі. Формули для розподілу температури в кулі та кількості теплоти, якою обмінюється куля з навколишнім середовищем. Література: [1-3,6,8,13,14,19].
14	Лекція 14 Нестационарний процес теплопровідності в тілах кінцевих розмірів. Теорема про перемноження розв'язків, її використання для визначення температурного поля в паралелепіпеді, циліндрі кінцевих розмірів та в нескінченному стержні прямокутного перерізу. Визначення кількості теплоти, якою обмінюються тіла кінцевих розмірів з навколишнім середовищем. Регулярний режим охолодження (нагрівання) тіл. Регулярний тепловий режим і його математичний опис. Темп охолодження і його визначення. Практичне застосування теорії регулярного режиму. Методи експериментального визначення теплофізичних характеристик (коефіцієнт тепловіддачі, коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності тіл). Література: [1-3,6,8,13,14,19].
15	Лекція 15 Чисельний метод розв'язку задач стаціонарної теплопровідності. Метод кінцевих різниць і його суть. Застосування методу кінцевих різниць для розрахунку двовимірного стаціонарного температурного поля. Чисельний метод розв'язку задач нестационарної теплопровідності. Застосування методу кінцевих різниць для розрахунку нестационарного температурного поля. Умова стійкості розрахунків. Метод електротеплової аналогії. Фізичні передумови методу і типи моделей. Моделі з безперервними та зосередженими параметрами. Кількісний зв'язок між аналогічними фізичними величинами, визначення констант аналогії. Література: Література: [1-3,6,8,12,13,14].
16	Лекція 16 Загальна фізична характеристика процесу. Фізична сутність процесу конвективного теплообміну. Тепловіддача. Основні фактори, що впливають на конвективний теплообмін: природа виникнення руху рідини; характер руху робочої рідини; фізичні властивості робочої рідини; геометрична характеристика твердої поверхні, яка замикає робочу рідину. Поняття про гідродинамічний та тепловий пограничні шари. Ламінарний і турбулентний режими течії рідини, їх вплив на конвективний теплообмін. Практичний розрахунок конвективної тепловіддачі, рівняння тепловіддачі Ньютона. Аналітичний опис процесів конвективного теплообміну. Система диференціальних рівнянь конвективного теплообміну: рівняння тепловіддачі на межі стінки і робочої рідини. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].

17	Лекція 17 Аналітичний опис процесів конвективного теплообміну. Рівняння енергії, руху рідини та суцільності (нерозривності) потоку. Умови однозначності для процесів конвективного теплообміну. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].
18	Лекція 18 Безрозмірний опис процесів конвективного теплообміну. Зведення диференціальних рівнянь конвективного теплообміну та умов однозначності до безрозмірного вигляду. Основні числа і критерії подібності для процесів конвективного теплообміну, їх фізичний зміст; загальний вигляд рівняння подібності. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20,22].
19	Лекція 19 Обробка і узагальнення дослідних даних. Постановка експерименту і узагальнення дослідних даних методом подібності. Отримання емпіричних рівнянь подібності. Визначальний геометричний розмір і визначальна температура. Межі використання емпіричних рівнянь подібності. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20,22].
20	Лекція 20 Гідродинамічна характеристика процесу при вимушеному русі рідини уздовж плоскої поверхні (пластини). Ламінарний і турбулентний гідродинамічні пограничні шари, визначення їх товщини та меж ламінарного і турбулентного пограничних шарів. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].
21	Лекція 21 Тепловіддача при поздовжньому омиванні пластини. Інтегральне рівняння енергії пограничного шару; його використання для наближеного аналітичного розрахунку процесу тепловіддачі при наявності ламінарного пограничного шару. Співвідношення між товщинами гідродинамічного і теплового пограничних шарів. Розрахунок тепловіддачі при турбулентному пограничному шарі на основі гідродинамічної теорії теплообміну. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].
22	Лекція 22 Тепловіддача при поздовжньому омиванні пластини. Аналогія Рейнольдса. Область її застосовності та розрахункові рівняння. Розрахунок тепловіддачі при одночасній наявності ламінарного і турбулентного пограничних шарів. Тепловіддача при вимушеному поперечному омиванні труб. Поперечне омивання циліндра та гідродинамічна картина руху рідини поблизу його поверхні в залежності від числа Рейнольдса. Пограничний шар на криволінійній поверхні, відрив пограничного шару від поверхні циліндра. Характер зміни тепловіддачі залежно від кутової координати циліндра. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].
23	Лекція 23 Тепловіддача при вимушеному поперечному омиванні труб. Залежність тепловіддачі від числа Рейнольдса, ступеня турбулентності набігаючого потоку та кута атаки. Емпіричні формули для розрахунку тепловіддачі. Основні типи трубних пучків. Характер руху рідини в коридорних і шахових пучках. Змішаний режим руху рідини в трубному пучку. Умови омивання труб окремих рядів пучка та характер зміни локальних коефіцієнтів тепловіддачі на цих трубах. Зміна середніх для окремих рядів коефіцієнтів тепловіддачі залежно від номера ряду. Вплив на коефіцієнт тепловіддачі ступеня турбулентності набігаючого потоку, геометричних характеристик трубного пучка та кута атаки. Емпіричні формули для розрахунку тепловіддачі в коридорних і шахових пучках. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].

24	Лекція 24 Особливості течії і теплообміну в трубах. Ламінарний і турбулентний режими. Ділянки гідродинамічної і теплової стабілізації. Характер зміни локального і середнього коефіцієнтів тепловіддачі в залежності від довжини труби. Тепловіддача при течії рідини в трубах круглого поперечного перерізу. Тепловіддача при ламінарній течії рідини. В'язкісний і в'язкісно-гравітаційний ламінарні режими течії в трубах. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].
25	Лекція 25 Тепловіддача при течії рідини в трубах круглого поперечного перерізу. Формули для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі. Тепловіддача при турбулентній течії нестисливої рідини. Теоретичний аналіз тепловіддачі з використанням положень гідродинамічної теорії теплообміну, емпіричні рівняння подібності для розрахунку тепловіддачі в прямих і зігнутих трубах. Тепловіддача при перехідному режимі. Тепловіддача в трубах некруглого поперечного перерізу. Еквівалентний діаметр каналу, його визначення для каналів прямокутного та кільцевого перерізу. Межі застосування методики розрахунку тепловіддачі з використанням еквівалентного діаметра каналу. Тепловіддача при поздовжньому омиванні пучка труб. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].
26	Лекція 26 Тепловіддача при вільному русі рідини в необмеженому просторі. Основні фактори, що обумовлюють природну конвекцію. Розподіл температур і швидкостей в пограничному шарі. Характер руху рідини уздовж вертикальної пластини, зміна локальних значень коефіцієнта тепловіддачі по висоті пластини. Характер руху рідини поблизу горизонтальних труб і горизонтальних пластин. Аналітичне розв'язання задачі тепловіддачі для умов ламінарного руху рідини уздовж вертикальної пластини. Експериментальні дані для розрахунку тепловіддачі. Література: [1-3,6,8,13,14,16].
27	Лекція 27 Теплообмін при вільному русі рідини в обмеженому просторі. Характер руху рідини в плоских вертикальних і горизонтальних прошарках, а також у циліндричному горизонтальному прошарку. Методика розрахунку теплообміну при вільній конвекції рідини в обмеженому об'ємі. Література: [1-3,6,8,13,14,16].

Практичні заняття

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	Практичне заняття 1 Вихідні кількісні характеристики: кількість теплоти, тепловий потік, густина теплового потоку, потужність внутрішніх джерел теплоти. Процеси тепловіддачі і теплопередачі, характеристики інтенсивності переносу теплоти для цих процесів. Рівняння теплового балансу для стаціонарного процесу теплопередачі. Література: [5,10,15,21].
2	Практичне заняття 2 Зв'язок між температурним полем і тепловим потоком та закон Фур'є. Література: [5,10,15,21].
3	Практичне заняття 3 Рішення задач на теплопровідність через плоску стінку при граничних умовах першого та третього родів. Література: [5,10,15,21].

4	Практичне заняття 4 Рішення задач на теплопровідність через циліндричну стінку при граничних умовах першого та третього родів. Література[5,10,15,21].
5	Практичне заняття 5 Рішення задач на теплопровідність через кульову стінку при граничних умовах першого та третього родів. Література[5,10,15,21].
6	Практичне заняття 6 Рішення задач на теплопровідність із внутрішніми джерелами теплоти. Література: [10,15,21].
7	Практичне заняття 7 Рішення задач на теплопровідність уздовж ребер різного профілю. Література: [10,15,21].
8	Практичне заняття 8 Рішення задач на теплопередачу через плоску ребристу стінку. Література: [10,15,21].
9	Практичне заняття 9 Рішення задач з використанням основ теорії подібності стосовно процесів теплопровідності. Література: [10,15,21].
10	Практичне заняття 10 Визначення температурного поля в нескінченній пластині та кількості теплоти, що віддається (акумулюється) пластиною. Література: [10,15,21].
11	Практичне заняття 11 Визначення температурного поля в нескінченному циліндрі та кількості теплоти, що віддається (акумулюється) циліндром. Література[10,15,21].
12	Практичне заняття 12 Визначення температурного поля в кулі та кількості теплоти, що віддається (акумулюється) кулею. Використання теореми про перемноження розв'язків для визначення температурного поля в циліндрі кінцевих розмірів. Література: [10,15,21].
13	Практичне заняття 13 Застосування теорії регулярного режиму для експериментального визначення коефіцієнтів теплопровідності і теплообміну тіл. Визначення коефіцієнта тепловіддачі методом регулярного режиму. Література: [10,15,21].
14	Практичне заняття 14 Основні числа і критерії подібності для процесів конвективного теплообміну, загальний вигляд рівняння подібності. Емпіричне рівняння подібності для тепловіддачі. Література: [10,15,21].
15	Практичне заняття 15 Розрахунок тепловіддачі при ламінарному і турбулентному пограничних шарах. Визначення товщини гідродинамічного і теплового пограничних шарів. Література: [10,15,21].
16	Практичне заняття 16 Рішення задач на тепловіддачу при поздовжньому омиванні пластини Література: [10,15,21].

17	Практичне заняття 17 Рішення задач на тепловіддачу при русі рідини в трубах. Література: [10,15,21].
18	Практичне заняття 18 Рішення задач на Тепловіддачу при вимушеному поперечному омиванні одиночної труби. Тепловіддачу при вимушеному поперечному омиванні пучка труб. Література: [10,15,21].

6. Самостійна робота студента

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1	Історія розвитку ТМО як науки. Література: [1-3,6,8,13,14].	2
2	Закон Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності. Диференційне рівняння теплопровідності. Література: [1-3,6,8,13,14,19].	2
3	Критичний діаметр теплової ізоляції циліндричної стінки Література: [1-3,6,8,13,14].	2
4	Критичний діаметр ізоляції кульової стінки. Література: [1-3,6,8,13,14].	2
5	Теплопровідність в кульовій стінці при наявності внутрішніх джерел теплоти. Література: [1-3,6,8,13,14,19].	2
6	Різні форми ребристих стінок. Література: [1-3,6,8,13,14].	2
7	Коефіцієнт ефективності ребрення, його оптимальне значення. Література: [1-3,6,8,13,14].	2
8	Приведення рівнянь до безрозмірного вигляду. Література: [1-3,6,8,13,14,22].	2
9	Аналогове і квазіаналогове моделювання Література: [1-3,6,8,13,14,22].	2
10	Порівняння процесів стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності. Література: [1-3,6,8,13,14,19].	2
11	Особливості нестаціонарного охолодження циліндра. Література: [1-3,6,8,13,14,19].	2
12	Перетворення рівняння нестаціонарної теплопровідності в кулі. Література: [1-3,6,8,13,14,19].	2
13	Визначення безрозмірних температур в тілах кінцевих розмірів. Теорема Кондратьєва. Література: [1-3,6,8,13,14].	2
14	Математичне моделювання процесів теплопровідності. Література: [1-3,6,8,13,14,22].	2
15	Вплив турбулентності на теплофізичні параметри рідини. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
16	Особливості рівняння нерозривності для стисливих і нестисливих рідин. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
17	Переваги безрозмірного записи системи рівнянь конвективного теплообміну. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2

18	Особливості отримання емпіричних рівнянь подібності. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
19	Ламінарний гідродинамічний підшар в турбулентному пограничному шарі. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
20	Гідродинамічна теорія Рейнольдса. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
21	Вплив кута набігання потоку на тепловіддачу при поперечному омиванні циліндра. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
22	Порівняння переваг і недоліків коридорних і шахових пучків труб. Доцільність застосування. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
23	Вплив неізотермічності на конфігурацію профілів швидкості. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
24	Еквівалентний діаметр для каналів різної конфігурації. Література: [1-3,6,8,13,14,18,20].	2
25	Особливості визначення коефіцієнту тепловіддачі в залежності від орієнтації поверхні при вільній конвекції. Література: [1-3,6,8,13,14,16].	2
26	Вільна конвекція біля тонких дротин. Література: [1-3,6,8,13,14,16].	2
27	Порівняння вільної конвекції у великому об'ємі і обмеженому просторі. Література: [1-3,6,8,13,14,16].	2
	Виконання РГР	6
	Підготовка до підсумкового контролю засвоєння кредитного модулю	30
	<u>Всього</u>	90

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Зазначається система вимог, які викладач ставить перед студентом:

- на заняттях дозволяється використання засобів зв'язку для пошуку інформації та виконання індивідуальних завдань;
- захист практичних завдань відбувається на практичному занятті у виділений для цього викладачем час;
- штрафні та заохочувальні бали:
 - відсутність на практичному занятті або лекції без поважної причини - мінус 2 бали;
 - участь в олімпіаді з дисципліни, розробка ситуаційних вправ, тестових завдань та задач з дисципліни, виконання завдань із удосконалення дидактичних матеріалів з дисципліни надається від 5 до 10 заохочувальних балів.

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

Види контролю знань студентів з дисципліни:

- відповіді на лекційних заняттях;
- відповіді на практичних заняттях;
- виконання завдань СРС;
- виконання МКР (дві частини);
- виконання і захист РГР;
- відповідь на екзамені – максимально 40 балів.

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

- 1) три відповіді в середньому кожного студента на лекційних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 2 студенти; при середній чисельності групи 18 осіб і двадцяти семи лекційних заняттях (54 години) отримуємо: $2 \cdot 27 / 18 \approx 3$ відповіді;
- 2) три відповіді в середньому кожного студента на практичних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 3 студенти; при середній чисельності групи 18 осіб і вісімнадцяти практичних заняттях (36 годин) отримуємо: $3 \cdot 18 / 18 \approx 3$ відповіді;
- 3) виконання завдань СРС;
- 4) виконання однієї МКР;
- 5) виконання і захист РГР;
- 6) відповідь на екзамені – максимально 40 балів.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Робота на лекційних заняттях

Ваговий бал — 1. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях: $r_1 = 1 \text{ бал} \times 3 = 3$ бали.

Критерії оцінювання:

1 бал — повна вірна відповідь на поставлене запитання; **0,5 балів** — відповідь має несуттєві похибки; **0 балів** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді.

2. Робота на практичних заняттях

Ваговий бал – 2. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях: $r_2 = 2 \text{ бали} \times 3 = 6$ балів.

Критерії оцінювання:

2 бали — повна вірна відповідь на поставлене запитання; **1 бал** — відповідь має несуттєві похибки; **0 балів** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді.

3. Виконання завдань СРС

Ваговий бал – 1. Максимальна кількість балів студента 27 (видається двадцять сім завдань на СРС, строк задачі завдання – не пізніше ніж через два тижні після видачі): $r_4 = 1 \text{ бал} \times 27 = 27$ балів. Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

1 бал – в повному об'ємі і вчасно надана відповідь; **0,5 балів** – не в повному об'ємі і вчасно надана відповідь; **0 балів** – невчасно надана відповідь або ненадана відповідь.

Штрафні бали:

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

Заохочувальні бали

– участь у наукових та/або науково-практичних конференціях, семінарах, симпозиумах – **5 балів**.

4. Модульна контрольна робота (МКР)

Проводиться дві частини МКР. Ваговий бал кожної частини – 5. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює $r_4 = 5 \times 2 = 10$ балів.

Критерії оцінювання:

5 балів – повна вірна відповідь на завдання; **4 бали** – відповідь має несуттєві похибки; **2-3 бали** – неповна відповідь; **0-1 бали** – наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, МКР не зараховано.

5. Виконання і захист РГР

Максимальна кількість балів за виконання РГР 10 балів і за захист 4 бали, тобто сумарна кількість балів дорівнює $r_5 = 14$. Завдання на РГР видається студенту на початку семестру, строк здачі – останнє практичне заняття. Захист РГР на консультації по дисципліні. Виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання (виконання РГР):

10 балів – виконання РГР в повному об'ємі, відповідність вимогам щодо оформлення; 7...8 балів – виконання РГР в повному об'ємі, незначна невідповідність вимогам щодо оформлення; 5...6 балів – виконання РГР з деякими незначними неточностями, відповідність вимогам щодо оформлення; 3...4 бали – р виконання РГР з деякими неточностями, незначна невідповідність вимогам щодо оформлення; 0...2 балів – виконання РГР неточне, невідповідність вимогам щодо оформлення – виконання РГР не зараховано.

Критерії оцінювання (захист РГР):

4 бали – повна вірна відповідь на поставлені запитання за темою РГР; 3 бали – відповідь має несуттєві похибки; 1...2 бали – неповна відповідь; 0 балів – наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, захист не зараховано.

Штрафні бали:

несвоєчасне представлення та/або захист РГР без поважної причини (хвороба) – -1 бал.

Заохочувальні бали

участь у наукових та/або науково-практичних конференціях, семінарах, симпозіумах – 5 балів.

6. Відповіді на екзамені

Екзамен проводиться у письмово-усній формі. Екзаменаційний білет складається з двох теоретичних питань і задачі. Перелік питань наведений у додатку до силабусу дисципліни. Два теоретичних питання оцінюються по 10 балів, а задача – 20 балів. Тобто, максимальна кількість балів за виконання завдання $10+10+20 = 40$ балів.

Критерії оцінювання:

Кожне питання екзаменаційної роботи оцінюється згідно до системи оцінювання:

правильне раціональне рішення, або повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 9...10 (18...20) балів;

достатньо повна відповідь, правильне рішення (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – 7...8 (14...17) балів;

неповна відповідь, рішення з помилками (не менше 50% потрібної інформації та деякі помилки) – 5...6 (11...13) балів;

незадовільна відповідь, або відсутність рішення (менше 50% потрібної інформації та помилки) – менше 5 (10) балів.

Штрафні бали:

додаткове питання з тем лекційного курсу отримують аспіранти, 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:

$$R_i = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5$$

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

Максимально можливий стартовий рейтинг: $R_c = 3+6+27+10 = 46$ балів.

Необхідною умовою допуску до екзамену є позитивна оцінка з виконання всіх завдань СРС, захист розрахункової роботи та стартовий рейтинг не менше $0,4 \times R_c = 18,4$ балів.

Аспіранти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж 18,4 бали, зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену з цієї дисципліни і мають академічну заборгованість.

Екзаменаційна складова R_E шкали дорівнює: $R_E = 40$ балів.

Таким чином, максимальна кількість балів за рейтинговою шкалою з дисципліни складає

$$R_D = R_c + R_E = 46 + 40 = 86 \text{ балів.}$$

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

За рішенням кафедри, згідно Тимчасового регламенту проведення семестрового контролю в дистанційному режимі (Наказ № 7/86 від 08.05 2020 року), допускається застосувати підхід щодо виставлення оцінки з кредитного модуля «автоматом» шляхом пропорційного перерахунку стартових балів у підсумкові за 100-бальною шкалою. При цьому обов'язковим залишається виконання студентом умов допуску до екзамену. Аспірантам, які набрали фактичний стартовий рейтинг не менший, ніж 0,9 від максимально можливого (тобто $R_c \geq 54$), екзаменатор може запропонувати виставити оцінку «Дуже добре». Найвища оцінка «автоматом» не виставляється.

Переведення стартових балів у підсумкові здійснюється за формулою

$$R = 60 + \frac{40 \cdot (R_i - R_D)}{(R_c - R_D)},$$

де R – оцінка за 100-бальною шкалою;

R_i – сума балів, набраних студентом продовж семестру;

R_c – максимальна сума вагових балів контрольних заходів продовж семестру;

R_D – бал допуску до екзамену.

Студенти, які хочуть підвищити оцінку з кредитного модуля, виконують екзаменаційну роботу. При цьому переведення стартових балів у підсумкові не здійснюється.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доцент., к.т.н., доцент Фуртат Ірина Едуардівна

Ухвалено кафедрою теоретичної і промислової теплотехніки (протокол № 16 від 23.06.2021 р.)

Погоджено Методичною комісією теплоенергетичного факультету (протокол № 11 від 24.06.2021р.)