Національна академія наук України

Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Заступник директора

_____

“25” 09 2025 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Тепломасообмін в енергетичному обладнанні

(назва навчальної дисципліни)

Підготовки докторів філософії

зі спеціальності G4 Енерговиробництво (спеціалізація G4.02 Теплоенергетика)

2025 / 2026 навчальний рік

Робочу програму навчальної дисципліни «Тепломасообмін в енергетичному обладнанні» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Теплоенергетика» підготовки здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за спеціальністю G4 Енерговиробництво (спеціалізація G4.02 Теплоенергетика).

Розробники: (вказати авторів, їхні наукові ступені, вчені звання та посади)
Кузнецов Михайло Олександрович, канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні ІЕМС НАН України

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою інституту 25 вересня 2025 року, протокол № 9.

Програму схвалено на розширеному засіданні відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів в енерготехнологічному обладнанні.

Протокол № 4 від 22.09.2025 р.

В. о. завідувача відділу

_____ Орлова Н. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Програму погоджено науково-технічною проблемною радою «Енергомашинобудування. Теплова та відновлювальна енергетика. Екологія».

Протокол № 6 від 25.09.2025 р.

Заступник голови НТПР

_____ Костіков А. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

1. Опис навчальної дисципліни

Мета викладання навчальної дисципліни

Метою викладання навчальної дисципліни є одержання теоретичних знань про тепломасообмінні процеси, що відбуваються в енергетичному обладнанні, зокрема в енергетичних установках з використанням енергії відновлюваних джерел, формування здатностей використовувати основні закони переносу теплоти та маси для аналізу та розрахунку основних тепломасообмінних процесів, конструктивних характеристик та теплових режимів роботи енергетичних установок.

Перелік компетентностей та програмних результатів навчання, що забезпечує дисципліна

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.

ФК1. Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукові результати, які створюють нові знання у сфері теплоенергетики та дотичних до неї міждисциплінарних напрямах.

ФК2. Здатність усно і письмово презентувати та обговорювати результати наукових досліджень та/або інноваційних розробок українською та англійською мовами, глибоке розуміння англомовних наукових текстів за напрямом досліджень з теплоенергетики.

ФК4. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру у сфері теплоенергетики, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

ФК5. Здатність ініціювати, розробляти і реалізовувати комплексні інноваційні проекти в теплоенергетиці та дотичні до неї міждисциплінарні проекти, лідерство під час їх реалізації.

ФК6. Здатність розробляти математичні моделі, що адекватно описують теплофізичні та термодинамічні процеси в досліджуваних об'єктах.

ФК7. Здатність застосовувати сучасні методи і програмні засоби для розв'язання задач тепломасообміну і термодинаміки в об'єктах отримання, перетворення та споживання теплової енергії.

ФК8. Здатність проводити обчислювальні експерименти з обробкою розрахункових даних, аналізувати та інтерпретувати теплофізичні дані, які отримано розрахунковим та/або експериментальним шляхом.

Програмні результати навчання

ПРН1. 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.

ПРН2. Вільно презентувати та обговорювати з фахівцями і нефахівцями результати досліджень, наукові та прикладні проблеми теплоенергетики державною та іноземною мовами, кваліфіковано відображати результати досліджень у наукових публікаціях у провідних міжнародних наукових виданнях.

ПРН4. 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 напрямах.

ПРН5. Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з теплоенергетики та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми.

ПРН6. 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.

ПРН7. Застосовувати сучасні інструменти і технології пошуку, оброблення та аналізу інформації, зокрема, статистичні методи аналізу даних великого обсягу та/або складної структури, спеціалізовані бази даних та інформаційні системи.

ПРН9. Ефективно використовувати сучасні програмні засоби для моделювання, ідентифікації і оптимізації тривимірних нелінійних теплофізичних процесів в об'єктах отримання, перетворення і споживання енергії.

Характеристика навчальної дисципліни

Вибіркова освітня компонента	
Кількість кредитів	3
Рік підготовки	2-й
Семестр	1-й
Загальна кількість годин	90
Лекції	24 год.
Практичні, семінарські заняття	6 год.
Індивідуальні заняття	__ год.
Самостійна робота	60 год.
Вид підсумкового контролю	іспит

2. Зв'язок з іншими освітніми компонентами

Освітні компоненти, що передують вивченню:
ОК5 Термодинаміка енергетичних систем
ОК7 Сучасні засоби комп'ютерного моделювання в енергетиці
Освітні компоненти, які розвивають результати навчання за цією дисципліною:
немає

3. Заплановані результати навчання

Після вивчення курсу аспіранти повинні:

Знати: основні закони та механізми тепломасообміну (теплопровідність, конвекція, випромінювання, дифузія); принципи роботи теплообмінних апаратів енергетичних установок; типові методики виконання теплових, масообмінних і гідравлічних розрахунків та розв'язку практичних задач, що пов'язані з тепломасообміном в обладнанні енергетичних установок.

Вміти: виконувати теплові та масообмінні розрахунки теплообмінних апаратів; застосовувати закони тепло- і масообміну для розв'язання інженерних задач; аналізувати вплив режимів роботи та конструктивних параметрів устаткування на ефективність теплообміну; застосовувати методи термоекономічного аналізу для оптимізації тепломасообмінних процесів в енергетичному обладнанні.

Розуміти: фізичну сутність процесів тепломасообміну в енергетичному обладнанні; взаємозв'язок між тепловими, гідродинамічними та масообмінними процесами; роль тепломасообміну в підвищенні ефективності енергетичних установок.

4. Тематичний план навчальної дисципліни

Тема 1. Основні поняття та визначення тепломасообміну

Методи дослідження теплових процесів. Температурне поле. Температурний градієнт. Тепловий потік. Гіпотеза Фур'є. Диференціальне рівняння теплопровідності. Крайові умови. Граничні умови I-IV роду. Закон Ньютона-Ріхмана.

Тема 2. Теплопровідність та теплопередача через стінку

Теплопровідність та теплопередача через плоску стінку. Температурне поле у плоскій стінці. Коефіцієнт теплопередачі. Тепловий потік через багатошарову плоску стінку. Теплопровідність та теплопередача через циліндричну стінку. Лінійна щільність теплового потоку. Лінійний коефіцієнт теплопередачі. Багатошарова циліндрична стінка. Критичний діаметр циліндричної стінки. Інтенсифікація теплопередачі.

Тема 3. Процеси конвективного теплообміну

Фізичні властивості рідин. Гідродинамічний та тепловий прикордонні шари. Диференціальні рівняння конвективного теплообміну. Теорія подібності. Критерії подібності. Критеріальні рівняння. Вільна конвекція у великому об’ємі біля вертикальних та горизонтальних поверхонь. Конвекція при вимушеному обмиванні плоскої поверхні. Тепловіддача при вимушеному поперечному обмиванні одиночної труби, коридорних та шахових пучків труб. Тепловіддача при вимушеної течії рідини у трубах та каналах. В'язкісний, в'язкісно-гравітаційний та турбулентний режими.

Тема 4. Теплообмін при фазових перетвореннях

Класифікація процесів конденсації. Тепловіддача під час плівкової та крапельної конденсації нерухомої пари. Рівняння Нуссельта. Тепловіддача при конденсації пари, що рухається, на одиночній трубі і на горизонтальному пучку труб. Процеси випаровування та кипіння. Умови зародження парової фази. Рівняння Лапласа. Динаміка парових бульбашок. Крива кипіння. Тепловіддача при бульбашковому та плівковому кипінні.

Тема 5. Теплообмін випромінюванням

Види променистих потоків. Випромінювальна здатність тіла. Абсолютно чорне тіло. Закони теплового випромінювання. Кутові коефіцієнти випромінювання. Теплообмін випромінюванням між твердими тілами. Екрани. Складний теплообмін. Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням. Металургійні нагрівальні печі.

Тема 6. Процеси масообміну

Процеси масообміну. Види дифузії. Закон Фіка. Коефіцієнт дифузії. Конвективний масообмін у двокомпонентних середовищах. Коефіцієнт масовіддачі. Потрійна аналогія перенесення імпульсу, енергії та маси. Масовіддача при ламінарному русі рідини вздовж плоскої поверхні. Масовіддача при турбулентної течії рідини

Тема 7. Тепловий та гідравлічний розрахунки теплообмінних апаратів

Типи теплообмінних апаратів за принципами дії. Схеми руху теплоносія. Рівняння теплового балансу та теплопередачі. Розрахунок необхідної поверхні. Перевірочний розрахунок. Гідравлічний розрахунок. Ефективність теплообмінного апарату.

5. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин						
	усього	у тому числі					
		лекції	практ.	лаб.	сем.	інд.	с.р.
Тема 1. ***Основні поняття та визначення тепломасообміну***	2	2					
Тема 2. ***Теплопровідність та теплопередача через стінку***	24	8					16
Тема 3. ***Процеси конвективного теплообміну***	20	6	2				12

Тема 4. ***Теплообмін при фазових перетвореннях***	8	2	2				4
Тема 5. ***Теплообмін випромінюванням***	12	2	2				8
Тема 6. ***Процеси масообміну***	10	2					8
Тема 7. ***Тепловий та гідравлічний розрахунки теплообмінних апаратів***	14	2					12
Усього годин	90	24	6				60

6. Самостійна робота

Метою самостійної роботи є навчитися користуватися навчально-методичними матеріалами, бібліотечними фондами, базами даних наукової літератури і інформаційними джерелами і іншими інформаційними джерелами, складати конспекти, аналізувати матеріал, порівнювати різні наукові концепції та робити висновки. Види самостійної роботи студента: опрацювання лекційного матеріалу; опрацювання тем курсу, які виносяться на самостійне вивчення; виконання завдань для самостійної роботи, відвідування консультацій; підготовка до підсумкового контролю.

Теми для самостійного вивчення

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Види ребристих поверхонь. Коефіцієнт ефективності ребра	2
2	Теплопровідність та теплопередача через кульову стінку	2
3	Теплопровідність за наявності внутрішніх джерел теплоти	4
4	Симетричні та несиметричні умови охолодження	4
5	Нестаціонарна теплопровідність. Нестаціонарне температурне поле в нескінченній пластині, циліндрі, кулі	6
6	Вільна конвекція у обмеженому просторі. Тепловіддача за малих значень числа Релея	4
7	Теплообмін у трубах некруглого перерізу. Вплив шорсткості поверхні на теплообмін у трубах. Вигнуті труби	2
8	Окремі задачі конвективного теплообміну. Задача Польгаузена	6
9	Криза бульбашкового кипіння у вільному об’ємі. Рівноважне теплове навантаження	4
10	Теплообмін випромінюванням в газових сумішах. Поглинаючі, випромінюючі та розсіювальні середовища. Закон Бугера	4
11	Променистий теплообмін між газом та його оболонкою	4
12	Тепло- та масовіддача при випаровуванні рідини в парогазове середовище. Випаровування води в повітря	8
13	Особливості розрахунку регенеративних теплообмінних апаратів	4
14	Схеми парогенераторів. Принципи теплового розрахунку парогенераторів	6
	Разом	60

Завдання для самостійної роботи

1. Розв'язати диференціальне рівняння теплопровідності у загальному вигляді: $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$ з такими граничними умовами: $t\,(0) = t_{c1}$, $t\,(\delta) = t_{c2}$.

2. Розв'язати одновимірну задачу теплопровідності для пластини з внутрішніми джерелами теплоти: $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0$. Граничні умови: при $x = \pm\delta$ $\alpha\left(t_c - t_p\right) = \mu\lambda\left(\partial t/\partial x\right)_{x=\pm\delta}$.

3. Розв'язати рівняння теплопровідності в циліндричних координатах: $\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r} = 0$ з такими граничними умовами: $t\,(r_1) = t_{c1}$, $t\,(r_2) = t_{c2}$.

4. Розв'язати задачу теплопровідності із внутрішніми джерелами теплоти в циліндричних координатах: $\frac{\partial^2 t}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}+\frac{q_v}{\lambda}=0.$ Граничні умови: а) умова симетрії у центрі стрижня: при $r=0$ $\left(dt/dr\right)_{r=0}=0$; б) тепловіддача з поверхні: при $r=r_0$ $-\lambda\left(\partial t/\partial r\right)_{r=r_0}=\alpha\left(t_c-t_p\right).$

5. Розв'язати нестаціонарну одновимірну задачу теплопровідності без внутрішніх джерел теплоти в декартових координатах: $\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau}=a\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}.$ Початкові умови: при $\tau=0$ $\vartheta=\vartheta_0=t_0-t_p$. Граничні умови через симетрію задачі лише для однієї половини пластини: при $x=0$ $\left(\partial\vartheta/\partial x\right)_{x=0}=0;$ при $x=\delta$ $\left(\partial\vartheta/\partial x\right)_{x=\delta}=-\frac{\alpha}{\lambda}\vartheta_{x=\delta}$. Розв'язати диференціальне рівняння методом Фур'є.

6. Визначити тепловий потік, що проходить через цегляну стінку висотою 5 м, шириною 4 м та товщиною 250 мм. Температури поверхонь стінки $t_{c1}=27$ °С, $t_{c2}=-23$ °С. Коефіцієнт теплопровідності цегли $\lambda=0{,}77$ Вт/(м·К).

7. Визначити тепловий потік через 1 м^2 цегляної стіни приміщення товщиною у дві цеглини ($\delta=510$ мм) з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda=0{,}8$ Вт/(м·К). Температура повітря всередині приміщення $t_{p1}=18$ °С; коефіцієнт тепловіддачі до внутрішньої поверхні стінки $\alpha_1=7{,}5$ Вт/(м^2·К); температура зовнішнього повітря $t_{p2}=-30$ °С; коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стіни, що обдувається вітром, $\alpha_2=20$ Вт/(м^2·К). Обчислити також температури на поверхнях стіни t_{c1} і t_{c2}.

8. Обмурівка печі складається з шарів шамотної та червоної цегли, між якими розташована засипка з діатоміту. Товщина шамотного шару $\delta_1=120$ мм, діатомітової засипки $\delta_2=50$ мм та червоної цегли $\delta_3=250$ мм. Коефіцієнти теплопровідності матеріалів відповідно дорівнюють: $\lambda_1=0{,}93$ Вт/(м·К); $\lambda_2=0{,}13$ Вт/(м·К) та $\lambda_3=0{,}7$ Вт/(м·К). Якої товщини слід зробити шар із червоної цегли δ_3, якщо відмовитися від застосування засипки з діатоміту, щоб тепловий потік через обмурівку залишався незмінним?

9. Паропровід діаметром 150/160 мм покритий шаром теплової ізоляції завтовшки $\delta_{із}=100$ мм; коефіцієнти теплопровідності стінки труби $\lambda_1=50$ Вт/(м·К) та ізоляції $\lambda_2=0{,}08$ Вт/(м·К). Температура на внутрішній поверхні паропроводу $t_{c1}=400$ °С та на зовнішній поверхні ізоляції $t_{c3}=50$ °С. Знайти теплові втрати з 1 м паропроводу та температуру на межі дотику паропроводу та ізоляції.

10. Змійовики пароперегрівача виконані з труб жароупорної сталі діаметром $d_1/d_2=32/42$ мм з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda=14$ Вт/(м·К). Температура зовнішньої поверхні труби $t_{c2}=580$ °С та внутрішньої поверхні труби $t_{c1}=450$ °С. Обчисліть питомий тепловий потік через стінку на одиницю довжини труби q_l, Вт/м.

11. Тонка пластина довжиною $l_0=2$ м та шириною $a=1{,}5$ м обтікається поздовжнім потоком повітря. Швидкість і температура потоку, що набігає, відповідно, $w_0=3$ м/с; $t_0=20$ °С. Температура поверхні пластини $t_c=90$ °С. Визначити середній за довжиною пластини коефіцієнт тепловіддачі і кількість теплоти, що віддається пластиною повітрю.

12. Обчислити середній коефіцієнт тепловіддачі при течії трансформаторного масла в трубі діаметром $d=8$ мм і довжиною $l=1$ м, якщо середня по довжині труби температура масла $t_p=80$ °С, середня температура стінки трубки $t_0=20$ °С і швидкість масла $w_0=0{,}6$ м/с.

13. Циліндрична трубка діаметром $d=20$ мм охолоджується поперечним потоком води. Швидкість потоку $w=1$ м/с. Середня температура води $t_p=10$ °С і температура поверхні трубки $t_c=50$ °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі від поверхні трубки до води, що охолоджує.

14. Визначити середній коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від поперечного потоку димових газів до стін труб котельного пучка. Труби діаметром $d=80$ мм розташовані в

шаховому порядку. Поперечний і поздовжній кроки труб, відповідно, $s_1 = 2{,}5d$; $s_2 = 2d$. Середня швидкість потоку газів у вузькому перерізі пучка $w = 10$ м/с. У напрямку потоку газу пучок складається із чотирьох рядів труб з однаковою поверхнею. Температура газу перед пучком $t_{р1} = 1100$ °С, за пучком $t_{р2} = 900$ °С. Забруднення поверхні труб не враховувати.

15. Порівняти коефіцієнти тепловіддачі для третього ряду труб по ходу повітря для двох повітропідігрівачів, конструктивно виконаних у вигляді трубних пучків з шаховим розташуванням труб. Обидва пучки обтікаються поперечними потоками повітря з однаковою швидкістю $w = 10$ м/с та середньою температурою потоку $t_р = 100$ °С. Діаметри труб у пучках, відповідно, $d_1 = 50$ мм і $d_2 = 25$ мм. Порівняння провести при однаковому для обох повітропідігрівачів відношенні кроків s_1 / s_2.

16. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі при конденсації сухої насиченої водяної пари на поверхні горизонтальної труби, якщо тиск пари зросте від 4 кПа до 400 кПа, а температурний напір залишиться без зміни?

17. Визначити середнє значення коефіцієнта тепловіддачі з боку сухої насиченої пари аміаку, що конденсується на поверхні горизонтального кожухотрубного конденсатору. Конденсація здійснюється холодною водою з температурою 21 °С, тиск конденсації 10 атм. Діаметр труб 19×1,5 мм. Розташування труб шахове.

18. Визначити теплове навантаження поверхні нагріву парогенератора при бульбашковому кипінні води у великому об’ємі, якщо вода перебуває під тиском $p = 620$ кПа, а температура поверхні нагріву $t_с = 175$ °С.

19. У трубі внутрішнім діаметром $d = 18$ мм рухається кипляча вода зі швидкістю $w = 1$ м/с. Вода перебуває під тиском $p = 800$ кПа. Визначити значення коефіцієнта тепловіддачі від стінки до киплячої води, якщо температура внутрішньої поверхні труби $t_с = 173$ °С.

20. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі при кипінні води у трубі діаметром $d = 38$ мм при підвищенні швидкості руху води від $w_1 = 0{,}3$ м/с до $w_2 = 3$ м/с, якщо теплове навантаження поверхні нагріву $q = 250$ кВт/м^2 та тиск води $p = 7{,}5$ МПа?

21. Температури двох пластин, поміщених у вакуум, дорівнюють 127 °С та 327 °С. Ступінь чорноти пластин однаковий і дорівнює 0,8. Між пластинами, які розташовані паралельно один одному, встановлений екран, що має ступінь чорноти 0,05. Обчислити щільність теплового потоку, що проходить через екран, та температуру екрана.

22. Ступінь чорноти вольфрамового дроту визначено за температури 2000 °С і дорівнює $\varepsilon = 0{,}3$. Визначити, яким був коефіцієнт тепловіддачі при цій температурі на поверхні дроту за рахунок випромінювання, якщо поверхня огорожі мала температуру 20 °С. Поверхня проволоки мала в порівнянні з поверхнею огородження.

23. Температура поверхні вихідного колектора пароперегрівача високого тиску $t_с = 500$ °С. Обчислити теплові втрати з 1 м неізольованого колектора шляхом променистого теплообміну, якщо зовнішній діаметр колектора $d = 275$ мм, коефіцієнт поглинання $A_с = 0{,}8$, а температура огорож $t_2 = 30$ °С.

24. Нагрівальну піч з метою зменшення теплових втрат оточили сталевим екраном. Розміри печі великі в порівнянні з відстанню між її зовнішньою поверхнею та екраном. В результаті вимірювань було отримано, що температура зовнішньої поверхні кладки печі дорівнює 107 °С, а температура стального екрана 57 °С. Знайти щільність результуючого променистого потоку від поверхні кладки до екрану, прийнявши ступінь чорноти кладки та екрана рівними відповідно 0,85 та 0,75.

25. Обчислити кутовий коефіцієнт та тепловий потік при променистому теплообміні між двома паралельними смугами, відстань між якими $h = 3$ м. Ширина смуг однакова $a_1 = a_2 = 2$ м, а довжина велика порівняно із шириною смуг. Ступінь чорноти смуг $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0{,}8$, а температури їхньої поверхні $t_1 = 500$ °С та $t_2 = 200$ °С.

26. Плоский вологий виріб довжиною $l = 0{,}5$ м поздовжньо омивається потоком сухого повітря, для якого температура $t_п = 20$ °С, тиск $p = 0{,}202$ МПа, швидкість $w = 1$ м/с. Температура виробу постійна по всій довжині ($t_с = 20$ °С). Знайти коефіцієнт масовіддачі β.

27. Тонка пластина довжиною $l_0 = 2$ м та шириною $a = 1{,}5$ м обтікається поздовжнім потоком повітря. Швидкість і температура потоку, що набігає, відповідно, $w_0 = 5$ м/с і $t_0 = 20$ °С. Визначити середній за довжиною пластини коефіцієнт масовіддачі.

28. Плоска пластина довжиною $l = 1$ м обтікається поздовжнім потоком повітря. Швидкість і температура потоку повітря, що набігає, $w_0 = 80$ м/с і $t_0 = 10$ °С. Перед пластиною встановлена решітка, що турбулізує, внаслідок чого рух у прикордонному шарі на всій довжині пластини турбулентний. Обчислити середнє значення коефіцієнта масовіддачі із поверхні пластини. Крім того, обчислити місцеві значення коефіцієнтів масовіддачі на відстанях $x = 0{,}1l_0$; $0{,}2l_0$; $0{,}5l_0$; $0{,}8l_0$ і $1{,}0l_0$ від передньої кромки пластини.

29. Плоска пластина обтікається поздовжнім потоком повітря. Швидкість і температура потоку, що набігає, дорівнює $w_0 = 6$ м/с і $t_0 = 20$ °С. Обчислити середній за довжиною пластини коефіцієнт масовіддачі. Розміри пластини вздовж потоку $l = 1{,}5$ м і поперек потоку $b = 0{,}9$ м. $D_0 = 0{,}216 \cdot 10^{-4}$ м^2/с.

30. Смуга води шириною 1 м обдувається поздовжнім потоком повітря довжиною 3 м. Швидкість повітря 2,5 м/с, температура води 10 °С. Показання психрометра $t_с = 17$ °С, $t_в = 12$ °С. Визначити з урахуванням аналогії процесів тепло- і масовіддачі кількість води, що випарувалася протягом 2 годин. Коефіцієнт дифузії води в повітрі при 0 °С прийняти $D_0 = 0{,}216 \cdot 10^{-4}$ м^2/с, барометричний тиск 740 мм рт. ст.

31. Визначити поверхню нагріву рекуперативного теплообмінника при прямоточному та протиточному русі теплоносіїв. Теплоносієм є газ з початковою температурою 600 °С та кінцевою 300 °С. Необхідно нагріти 40 000 м^3/год повітря (об'єм за нормальних фізичних умов) від 30 °С до 250 °С. Прийняти коефіцієнт теплопередачі 20 Вт/(м^2·К), теплоємність повітря постійна.

32. Суха насичена пара з тиском $6{,}18 \cdot 10^5$ Па конденсується в теплообміннику на трубах, усередині яких рухається вода, що нагрівається від 20 °С до 70 °С. Визначити середньологарифмічний та середньоарифметичний температурні напори.

33. У теплообміннику гарячим мазутом нагрівається сира нафта від 20 °С до 160 °С. При цьому мазут остигає від 280 °С до 190 °С. Знайти середні температурні напори – арифметичний $\Delta t_{\text{сер a}}$ та логарифмічний $\Delta t_{\text{сер ln}}$ у теплообміннику для прямотечії та протитечії. У скільки разів при протитечії поверхня нагріву буде меншою порівняно з прямотечією, якщо в обох випадках прийняти однаковими коефіцієнти теплопередачі k та теплові потоки Q? На скільки відсотків зменшиться поверхня теплообміну за однакових k та Q, якщо при прямотечії використовувати $\Delta t_{\text{сер a}}$ замість $\Delta t_{\text{сер ln}}$?

34. Трубчастий теплообмінник має поверхню теплообміну 48 м. У ньому нагрівається 85,5 т/год води від 77 °С до 95 °С. Гріючим середовищем є насичена водяна пара при надмірному тиску $0{,}43 \cdot 10^5$ Па. Визначити коефіцієнт теплопередачі.

35. У прямоточному теплообміннику вода охолоджує рідину. Витрата води та її початкова температура 0,25 кг/с та 15 °С. Ті ж величини для рідини відповідно 0,07 кг/с та 140 °С. Коефіцієнт теплопередачі 35 Вт/(м^2·К), поверхня теплообміну 8 м^2. Теплоємність рідини 3 кДж/(кг·К). Знайти кінцеві температури води і рідини та переданий тепловий потік, якщо прийняти лінійну зміну температур теплоносіїв за довжиною теплообмінника. Визначити ефективність (ККД) охолоджувача.

* за бажанням здобувача він може сам скласти перелік завдань для самостійної роботи, адаптувавши їх під своє наукове дослідження, за умови узгодження переліку і змісту завдань з викладачем і науковим керівником.

Індивідуальні завдання

1. Термоекономічна оптимізація енергетичних і тепломасообмінних характеристик вакуумно-випарного теплового насоса, що використовує воду (R718) як холодоагент.

2. Термоекономічна оптимізація енергетичних і тепломасообмінних характеристик теплонасосної системи теплопостачання.

3. Розрахунок оптимальних параметрів експлуатації холодильної машини, що переведена в режим роботи теплового насоса.

4. Розв’язок задачі термоекономічної оптимізації режимних параметрів експлуатації теплонасосної сушильної установки.

5. Знаходження оптимальних термоекономічних параметрів надкритичного кондиціонера з холодагентом R744 (CO_2).

* за бажанням здобувача він може сам запропоновувати тему і зміст індивідуального завдання, виходячи із змісту навчальної дисципліни і тематики свого наукового дослідження, за умови узгодження їх з викладачем і науковим керівником.

7. Методи навчання

При викладанні дисципліни застосовуються словесні, наочні та практичні методи навчання. Словесні та наочні методи навчання використовуються під час лекцій, самостійної роботи, консультацій, практичні – при здійсненні студентами самостійної роботи. Під час проведення лекцій використовуються такі словесні методи як розповідь і пояснення. До числа наочних методів, які застосовуються при викладанні дисципліни, належать: ілюстрація, демонстрація, робота із програмними продуктами для розв’язання задач з оптимізації тепломасообмінних процесів в енергетичному обладнанні.

8. Методи контролю

Поточний контроль теоретичних знань, що отримані здобувачем вищої освіти ступеня доктора філософії здійснюється шляхом опитування та перевірки виконання завдань для самостійної роботи.

Підсумковий контроль проводиться у вигляді екзамену.

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота								Екзамен	Сума
Т1	Т2	Т3	Т4	Т5	Т6	Т7	Разом	30	100
10	10	10	10	10	10	10	70		

Т1, Т2 ... – теми розділів.

Критерії оцінювання

Бали поточного контролю за кожною темою складаються з оцінювання відповідей під час усного опитування щодо засвоєння лекційного матеріалу (1 – розуміння окремих положень, 2 – розуміння окремих методів виконання тепломасообмінних розрахунків, 3 – досконале засвоєння методів виконання тепломасообмінних розрахунків, 4 – вміння адаптувати засвоєні методи для розв’язання комплексних задач тепломасообмінну), оцінювання ступені опрацювання матеріалу тем для самостійного вивчення (1 – часткове розуміння матеріалу, 2 – досконале розуміння матеріалу) та оцінювання виконання завдання для самостійної роботи (1 – вміння вибрати методику для розв’язання поставленої задачі; 2 – розробка методики розв’язання поставленої задачі, 3 – часткове застосування розробленої методики; 4 – повне застосування методики з отриманням частково помилкових результатів, 5 – розв’язок поставленої задачі в цілому, 6 – повний розв’язок поставленої задачі з творчим аналізом отриманих результатів).

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка
90–100	відмінно
70–89	добре
50–69	задовільно
1–49	незадовільно

10. Рекомендоване методичне забезпечення

Конспект лекцій
Перелік завдань і методичні матеріали для самостійної роботи

Основна література

1. Маляренко В. А., Сенецький О. В. Тепломасообмін в об’єктах альтернативної енергетики : підручник; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 311 с.
2. Вассерман О. А., Слинько О. Г., Мальчевський В. П. Основи тепломасообміну. Одеса : Фенікс, 2014. 150 с.
3. Василенко С. М., Українець А. І., Олішевський В. В. Основи тепломасообміну : Підруч. для студ. вищ. навч. закл. / За ред. І. С. Гулого; Нац. ун-т харч. технологій. К. : НУХТ, 2004. 249 с.
4. Погорєлов А. І. Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку) : навчальний посібник для вузів, 2-ге видання. Львів : «Новий світ - 2000», 2004. 144 с.
5. Константінов С. М. Теплообмін : Підручник. К.: ВПІ ВПК "Політехніка": Інрес, 2005. 304 с.

Допоміжна література

6. Горбунов О. Д. Термінологічний словник з тепломасообміну. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 71 с.
7. Лабай В. Й. Приклади і задачі з курсу тепломасообміну. Львів : Вид. Львівської політехніки, 2017. 228 с.
8. Дреус А. Ю., Лисенко К. Є., Сясев В. О. Збірник задач з тепломасообміну. Д. : ДНУ ім. О. Гончара, 2016. 124 с.
9. Чепурний М. М., Резидент Н. В. Тепломасообмін в прикладах і задачах : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2011. 128 с.
10. Kuznetsov M. A., Tarasova V. A., Kharlampidi D. Kh. Method for the optimal design of vacuum-evaporative heat pumps. Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 22, No. 2 (June). P. 21–31.
11. Tarasova V., Kuznetsov M., Kharlampidi D., Kostikov A. Development of a vacuum-evaporative thermotransformer for the cooling system at a nuclear power plant. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 4, No. 8 (100). P. 45–56.
12. Харлампіді Д. Х., Тарасова В. О., Кузнецов М. О. Розробка вакуумно-випарного теплового насосу для системи охолодження ТЕС і АЕС. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XIX міжнар. наук.-практ. конф., 26-28 вересня 2018 р., Київ: ІВЕ НАНУ, 2018. С. 204–208.
13. Kuznetsov M., Kharlampidi D., Tarasova V., Voytenko E. Thermoeconomic optimization of supercritical refrigeration system with the refrigerant R744 (CO_2). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 6, No. 8 (84). P. 24–32.

Інформаційні ресурси

1. Навчально-методичний комплекс навчальної дисципліни у сховищі Google Drive.
2. Мережа Internet.
3. Бібліотека ІЕМС НАН України.