Національна академія наук України

ІНСТИТУТ ГАЗУ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Інституту газу
НАН України
член-кореспондент НАН України,
д.т.н., проф.
_____ Г.В. Жук
«30» вересня 2026 р.

Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

підготовки _____доктора філософії
(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

спеціальності __144 “Теплоенергетика ”
(шифр і назва)

та

спеціальності _G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією)
(шифр і назва)

спеціалізація _G4.02 Теплоенергетика_____
(шифр і назва)

Ухвалено Вченою радою Інституту газу НАН України

Протокол № 11 від 30 вересня 2026 року

Голова _____ Г.В. Жук
(підпис) (ініціали, прізвище)
30.09.2026 року

Вводиться в дію з « 01 » жовтня 2026 року.

КИЇВ – 2026

Робоча програма навчальної дисципліни «Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках» (силабус) для аспірантів за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», галузі знань 14 «Електрична інженерія», третього освітньо-наукового рівня доктор філософії в галузі електричної інженерії, за денною/заочною формою навчання.

Робоча програма навчальної дисципліни «Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках» (силабус) для аспірантів за спеціальністю G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією), спеціалізація G4.02 «Теплоенергетика» в галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво, третього освітньо-наукового рівня доктор філософії, за денною/заочною формою навчання.

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Завідувач відділу, д-р техн. наук, проф. Сорока Борис Семенович
(посада, наукова ступінь, вчене звання, ПІБ)

1. Опис кредитного модуля

<table>
<tr><th>Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень</th><th>Загальні показники</th><th>Характеристика кредитного модуля</th></tr>
<tr><td>Галузь знань:
14 «Електрична інженерія»
G «Інженерія, виробництво та будівництво»</td><td>Назва навчальної дисципліни, до якої належить кредитний модуль «Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках»</td><td>Форма навчання
денна / заочна</td></tr>
<tr><td>Спеціальність:
144 «Теплоенергетика»
G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією)</td><td>Кількість кредитів ECTS – 6</td><td>Статус кредитного модуля
Вибіркова частина підготовки</td></tr>
<tr><td>Спеціалізація:
G4.02 Теплоенергетика</td><td>Кількість розділів – 3</td><td>Цикл, до якого належить кредитний модуль
немає</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Освітньо-науковий рівень: доктор філософії</td><td></td><td>Рік підготовки: 3-й
Семестр: 5-й</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Загальна кількість 180 год.</td><td>Лекції 15 год.</td></tr>
<tr><td>Практичні (семінарські) 15 год.</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>Самостійна робота 150 год.</td></tr>
<tr><td>Вид та форма семестрового контролю:
Екзамен</td></tr>
</table>

Кредитний модуль «Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках» входить до вибіркової частини підготовки та має важливе значення у підготовці більш спеціалізованого фахівця з теплоенергетики. У структурно-логічній схемі програми підготовки з даного напряму навчальна дисципліна «Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках» забезпечує інші навчальні дисципліни у програмі підготовки фахівця, які потребують знань, щодо теорії паливних печей та інтенсифікації теплових процесів у високотемпературних енергоустановках.

Загальний курс кредитного модуля «Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках» становить важливу складову наукової та інженерної освіти спеціалістів з теплоенергетики, які здійснюють науково-технічну діяльність у цьому напрямку.

2. Мета та завдання кредитного модуля

2.1. Метою кредитного модуля є формування у аспірантів здатностей:

- логічного мислення, розвиток інтелектуальних здібностей;
- виховання у здобувачів науково-технічної культури, необхідної ерудиції та інтуїції у питаннях прикладного застосування науково-технічних знань;
- застосування методологічних знань у розв'язанні інженерних розрахунків;
- доводити розв'язок задачі до практично прийнятного результату – числа, графіка, якісного висновку із застосуванням довідників, таблиць, обчислювальних засобів;
- самостійно вивчати літературу з дисципліни «Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках»;
- вироблення навичок аналізувати, узагальнювати і застосовувати одержані результати.

2.2.Основні завдання кредитного модуля.

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни аспіранти після засвоєння кредитного модуля мають продемонструвати такі результати навчання:

КОМПЕТЕНТНІСТЬ:

- в процесах переносу теплоти і маси у відповідності до вимог технологічного процесу у печах та топках різного призначення;
- в методах розрахунку факельних процесів у топкових системах;
- в методах розрахунку високотемпературного теплообміну в умовах радіаційно прозорого, «сірого» та селективно випромінюючого (поглинаючого) середовища;
- в методах інтенсифікації зовнішнього теплообміну в печах різного температурного рівня.

ЗНАННЯ: енергетичних балансів та методів розрахунку (ККД використання палива) промислових печей;

- процесів горіння палива, пальникових пристроїв та факельних процесів в проми-

слових печах; сучасних паливних систем печей при централізованому (зосередженому) та розосередженому способах введення палива та димовидалення;
- конструкцій сучасних печей та систем кисневого (“Oxy-fuel”) спалювання;
- конструкцій печей періодичної та безперервної дії, особливостей стаціонарного та нестаціонарного теплообміну в печах; принципів роботи та особливостей розрахунку печей з імпульсним опаленням;
- зонального методу розрахунку печей: поняття про взаємні поверхні теплообміну– прямі, повні, спрямовані; особливостей розрахунку поверхонь взаємного обміну між газовими (об’ємними) та поверхневими зонами;
- сучасних теплоутилізаційних пристроїв промислових печей: рекуперативних та регенеративних; конвективних та радіаційних рекуператорів, методів їхнього розрахунку, впливу утилізації теплоти на витрати палива.

- УМІННЯ: виконувати розрахунки факельних процесів в печах;
- визначати граничні умови та характерні критерії подібності для теплового розрахунку зовнішнього та внутрішнього теплообміну;
- виконувати розрахунки спряженого теплообміну відповідно до технологічного процесу;
- створювати математичні моделі процесів у топковому просторі з урахуванням аеродинаміки (масопереносу), горіння та тепломасообміну;
- виконувати розрахунки паливних печей в зональній постановці (зональний метод теплового розрахунку).

Інтегральна компетентність: Здатність продукувати нові ідеї, розв'язувати комплексні проблеми у теплоенергетичній галузі професійної та/або дослідницько-інноваційної діяльності, застосовувати методологію наукової та педагогічної діяльності, а також проводити власне наукове дослідження, результати якого мають наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

Загальні компетентності, яких набуває здобувач:

ЗК01. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК03. Здатність розв’язувати комплексні проблеми у сфері теплоенергетики на основі системного наукового світогляду та загального культурного світогляду із дотриманням принципів професійної етики та академічної доброчесності.

Спеціальні (фахові) компетентності, яких набуває здобувач:

С(Ф)К01. Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у сфері теплоенергетики та дотичних до неї міждисциплінарних напрямах

С(Ф)К04. Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру у сфері теплоенергетики, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень

С(Ф)К05. Здатність ініціювати, розробляти і реалізовувати комплексні інноваційні проекти в теплоенергетиці та дотичні до неї міждисциплінарні проєкти, проявляти лідерство під час їх реалізації.

С(Ф)К06. Здатність розуміти сучасні проблеми науково-технічного та екологічного аспектів розвитку енергетики, знати сучасні технології енерго-, еколого- та ресурсозбереження.

Програмні результати навчання (ПРН):

ПРН01. 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, отримувати нові знання та/або здійснювати інновації.

ПРН05. Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з теплоенергетики та дотичних міждисциплінарних напрямів із використанням сучасних інструментів, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу сучасних знань щодо досліджуваної проблеми.

ПРН06. Розробляти та реалізовувати наукові та/або інноваційні інженерні проєкти, 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.

ПРН09. Проводити критичний аналіз різних інформаційних джерел конкретних освітніх, наукових та професійних текстів в сфері обраної спеціальності; вміння виявляти теоретичні та практичні проблеми, а також дискусійні питання в конкретних освітніх, наукових та професійних текстах в сфері теплоенергетики, критично сприймати та аналізувати чужі думки та ідеї, шукати власні шляхи вирішення проблеми.

Програмні результати навчання професійного спрямування вибіркових дисциплін:

1. Знати методи розрахунку та моделювання печей та теплових режимів термічної обробки матеріалів, типи промислових печей, відповідні методи розрахунку; класифікацію пальникових пристроїв та їх застосування відповідно до призначення теплового процесу та виду печі; методи розрахунку нагрівання або плавлення матеріалів, особливості теплообміну в печах, методи використання вторинної теплоти.

Вміти виконувати CFD – моделювання робочого простору пічних агрегатів, кінетичних розрахунків розвитку процесів горіння у робочому просторі печей; вибирати тип печі та технологічний процес термічної обробки матеріалів залежно від їх цільового призначення. Розробляти технічні рішення щодо мінімізації впливу викидів шкідливих речовин на довкілля.

3. Структура кредитного модуля

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин*				
	Всього	у тому числі			
		Лекції	Практ.	Лаборант. (комп.пр.)	СРА
1	2	3	4	5	6
Теорія паливних печей та інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках					
Тема 1. Термодинаміка процесів використання палива. Органічні та альтернативні палива як енергетичне джерело при використанні в паливних печах.	24	2	2		20
Тема 2. Основні термодинамічні функції та критерії для оцінки ефективності паливовикористання.	24	2	2		20
Тема 3. Вихідні положення теорії горіння. Базові процеси горіння та сучасні методи спалювання газового палива в промислових печах.	22	1	1		20
Тема 4. Методи розрахунку теплообміну в робочому просторі паливних печей, енергоустановок різного призначення та утилізаторів теплоти.	24	2	2		20
Тема 5. Режими теплообміну в робочому просторі печей.	24	2	2		20
Тема 6. Аналогія процесів перенесення імпульсу, енергії (теплоти) та маси – потрійна аналогія (аналогія Рейнольдса).	24	2	2		20
Тема 7. Окремі високотехнологічні методи інтенсифікації теплообміну в топкових системах.	24	2	2		20

Тема 8. Забруднення атмосфери в результаті вироблення та споживання енергії при спалюванні органічних палив (fossil fuels).	14	2	2		10
ВСЬОГО:	**180**	**15**	**15**		**150**

4.Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (посилання на літературу)
	Розділ 1. Ефективність використання енергії та палива в промислових печах та енергетичних установках. ***Основні термодинамічні функції, пов'язані з використанням палива.***
1.	**Лекція 1.** Термодинаміка процесів використання палива. Органічні та альтернативні палива як енергетичне джерело при використанні в паливних печах. ККД використання палива за наявною енергією (1-ий початок термодинаміки). Карно теорема. Карно цикл. ККД використання палива за корисною теплотою процесу (2-ий початок термодинаміки).
2.	**Лекція 2.** Основні термодинамічні функції та критерії для оцінки ефективності паливовикористання. Сучасні системи та пристрої *утилізації теплоти* викидних газів (продуктів згоряння). Сучасна теорія та методи *заміщення палив* (Fuels interchangeability), в т.ч. із застосуванням 2 – го початку термодинаміки.
	Розділ 2. Горіння та теплообмін в паливних печах
3.	**Лекція 3.** Вихідні положення теорії горіння. Базові процеси горіння та сучасні методи спалювання газового палива в промислових печах. Спалювання підготовленої газо-окислювальної суміші та спалювання в дифузійному факелі включаючи горіння коаксіальних потоків газового палива та повітря – окислювача (premixed combustion and non-premixed combustion, including diffusion combustion with coaxial flows of fuel and oxidant (mostly – an air)). Процеси горіння в бунзенівських атмосферних пальниках.
4.	**Лекція 4.** Методи розрахунку теплообміну в робочому просторі паливних печей, енергоустановок різного призначення та утилізаторів теплоти. Зовнішній теплообмін: радіаційний, конвективний, радіаційно-, конвективний. Основні критерії та числа подібності для зовнішнього та внутрішнього теплообміну. Поняття та закони радіаційного теплообміну. Урахування обмежень за внутрішнім та / або зовнішнім теплообміном при розрахунках печей.
5.	**Лекція 5.** Режими теплообміну в робочому просторі печей. Способи прямого та непрямого радіаційного та радіаційно-конвективного

	теплообміну у порівнянні з режимом рівномірно розподіленого теплообміну як найбільш поширені способи інтенсифікації теплообміну. Можливості інтенсифікації теплообміну за рахунок турбулізаторів та вторинних випромінювачів.
	Розділ 3. Інтенсифікація теплових процесів у високотемпературних енергоустановках
6.	**Лекція 6.** Аналогія процесів перенесення імпульсу, енергії (теплоти) та маси – потрійна аналогія (аналогія Рейнольдса). Вплив різних складових перенесення теплоти на наявність аналогія Рейнольдса. Радіаційний теплообмін як фактор порушення аналогії процесів перенесення і середньої потужності України. Київ : ФОП Маслаков, 2019. 108 с.
7.	**Лекція 7.** Окремі високотехнологічні методи інтенсифікації теплообміну в топкових системах. Сполучення окремих камер згоряння печей, двигунів між собою та з утилізаторами теплоти, в т.ч. тепломасообмінних рекуператорів. Теплообмін при організації процесу горіння на межі розділу фаз. Інтенсифікація теплообміну в паливних печах з багатократною рециркуляцією. Імпульсне введення
8.	**Лекція 8.** Забруднення атмосфери в результаті вироблення та споживання енергії при спалюванні органічних палив (fossil fuels). Процес карбонізації навколишнього середовища за рахунок парникових викидів, їхнє скорочення шляхом заміни органічного палива альтернативним паливом та джерелами енергії – склад парникових газів в залежності від складу палива; – перехід до «зеленої» енергетики, «зелений» водень можливості виробництва, приклади використання. Утворення шкідливих речовин: оксидів азоту NO_x та вуглецю CO. Напрямки спалювання із скороченням шкідливих викидів: дво–та багатостадійне горіння; рециркуляція продуктів згоряння; «вологе» горіння.

5. Практичні заняття

Основні завдання циклу практичних занять: навчитися застосовувати отримані знання при розв'язуванні практичних задач щодо проведення розрахунків паливних печей та інтенсифікації теплових процесів у високотемпературних енергоустановках, здійснювати підбір обладнання та моделювання технологічних процесів.

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань
1.	**ПЗ 1 Аеродинамічні засади розрахунку топкових камер та робочого простору вогневих технічних систем та промислових печей. Місце аеродинамічної складової в теплообмінних процесах.** *Поняття «ідеальна піч». Вплив ідеальності на основну характеристику - залежність ККД від теплової потужності печі (топки).* Топкові камери як хімічні реактори: ідеального витискування (PFR –

	plug Flow Reactor) та ідеального перемішування (PSR – Perfectly Stirred Reactor). Час перебування в реакторі. Питомі витрати палива з урахуванням ідеальності печі.
2.	**ПЗ 2 Переміщення газових потоків у робочому просторі печей та топкових камер. Витікання газів із отворів, каналів та сопел.** Аеродинамічний опір в умовах переміщення газових потоків. Роль режиму течії ламінарного, турбулентного горіння та вплив чисел Рейнольдса. Розрахунок димової труби. Витікання газу, що не стискується (несжимаемого газа – русск., incompressible gas - English), з отворів, насадків,сопел. Витікання газу, що стискується (сжимаемого газа – русск., compressible gas - English), з сопел та насадків.
3.	**ПЗ 3 Основні енергетичні та вогнетехнічні характеристики газового палива.** Теплота хімічної реакції, масова, об'ємна. Теплоти згоряння: вища, нижча. Числа Воббе, вище, нижче. Метанове число. Швидкість поширення полум'я. Теоретична (адіабатна)температура горіння. Температура запалювання (самозапалювання). Метанове число палив. Точка роси газового палива. Стехіометричне число, об'ємне, масове: для вологих та сухих продуктів згоряння.
4.	**ПЗ 4 Заміщення палив та утилізація теплоти викидних продуктів згоряння** Баланс енергії в термінах повних ентальпій для системи «піч-реактор». Термодинаміка заміщення палив в термінах повних ентальпій. Урахування вологовмісту повітря-окислювача, палива та / або паливо-окислювальної суміші при оцінці впливу на витрати енергії та палива. Роль температурного фактора та призначення печі в енергоефективності в умовах заміни типу палива та утилізації теплоти викидних газів.
5.	**ПЗ 5 Теплоутилізаційні пристрої промислових печей та котлів** Рекуперативні теплообмінники. Конвективні та радіаційні. Фізичні та фізико-хімічні засади утилізації теплоти печей і викидних продуктів згоряння з печей. Технології багатоступеневої утилізації, комбіновані процеси утилізації теплоти. Термохімічна рекуперація (ТХР) теплоти викидних газів. Комбіновані масотеплообмінні процеси з використанням води і водяної пари та апарати утилізації викидної енергії теплотехнічного обладнання.
6.	**ПЗ 6 Теорія ламінарного горіння** Структура фронту горіння. Швидкість ламінарного горіння, характерний час горіння. Нормальне розповсюдження полум'я, роль та вплив фізичних і кінетичних параметрів горючої суміші на швидкість та межі горіння S_L для окремих газових палив. Використання повної ентальпії при формуванні рівняння переносу енергії у фронті горіння. **Спалювання за умови попередньої підготовки паливо- окислювальної суміші в камері (premixed combustion). Спалювання коаксіальних потоків горючого та окислювача**. Затримка запалення (Ignition delay ADT).

	Вплив типу горючого на ADT в залежності від температури горіння.
7.	**ПЗ 7 Структура факелу при спалюванні газу, в тому числі підготовленої газоповітряної суміші в камері згоряння з пальниковим тунелем та з периферійною зоною рециркуляції продуктів (вздовж осі та в перерізах).** Вплив швидкості подачі горючої суміші на довжину області горіння (факелу). Роль зони рециркуляції в тунелі та камері згоряння.
8.	**ПЗ 8 *Граничні умови теплообміну при тепловій обробці металевих та неметалевих тіл.*** *I,II,III,IV роди* граничних умов**.** Основні фізичні закони переносу. Вибір граничних умов для розрахунку технологічних печей та утилізаторів теплоти. Закон Ньютона тепловіддачі біля поверхні як складова гранична умова. Температурний та теплоємкісний опір граничного шару при теплообміні з одним чи кількома складовими, що визначають граничні умови для процесів переносу маси та теплоти: ефект Соре – для дифузії, закон Фіка – молекулярний переніс маси; Фур'є – молекулярний переніс.
9.	**ПЗ 9 *Початкові умови теплообміну, їхня універсальність (фіксованість) з огляду визначення попередніх температурних розподілів.*** Основні режими теплової обробки середовищ, матеріалів та виробів в топках та печах. Встановлений та невстановлений, квазівстановлений режими. Рівноважні та нерівноважні режими. Регулярний режим I та II роду.
10.	**ПЗ 10 Теплообмін випромінюванням у пічному просторі.** Типи теплових потоків, що задіяні в процесах теплообміну випромінюванням: падаючий, відбитковий, власного випромінювання, ефективний, сприйнятий, результуючий. Вплив температури та оптико- геометричних характеристик робочих тіл, що обмінюються енергією, на результуючий тепловий потік Основні закони теплообміну випромінюванням: Стефана-Больцмана, Планка, Віна, Бера-Ламберта-Бугера, Кірхгофа.
11.	**ПЗ 11 Конвективний теплообмін в топкових системах та промислових печах** **Вільна, вимушена та комбінована конвекція** Вимушена конвекція при повздовжньому обтіканні поверхні. Вимушена конвекція при обтіканні труб і циліндрів поперек поверхонь. Ламінарний та турбулентний режими руху гріючих газів, їхній вплив на інтенсивність теплообміну. Розрахунок печей та теплообмінних апаратів як задача сполученого (сопряженного – русск., conjugated – Englsh) теплообміну – для систем: піч– вироби, що гріються; стінки каналів теплообмінника – потік теплоносія.
	ПЗ 12 Теплообмін випромінюванням у газовому середовищі Моделі випромінювання газів. Модель випромінювання у вигляді зваженої суми сірих газів. Оптична щільність. Модель «зваженої суми сірих газів».

	Діаграми Хоттеля для випромінюючої здатності H_2O та CO_2. Розрахунок ступеню чорноти випромінюючих газів, включаючи суміш продуктів згоряння, в т.ч. при наявності дисперсної фази. Спрощений розрахунок теплообміну випромінюванням в печах та топкових камерах.
	ПЗ 13 Розрахунок теплових процесів в печах та топкових камерах як у замкнутій системі з окремими теплообмінними поверхнями. Розрахунок теплообміну у замкнутій системі із ***n*** ізотермічних сірих поверхонь для двох випадків: а) прозорого середовища в об'ємі топки або печі (діатермічне середовище; б) для випадку, що моделює процес у паливовикористовуючих топкових системах, в тому числі промислових печах при наявності випромінюючого ізотермічного сірого газу. Теплообмін випромінюванням у найпростішій пічній системі за Г.Л. Поляком.
	ПЗ 14 Роль футеровки печі (топкових пристроїв) у теплообміні. Розрахунок теплообміну випромінюванням при адіабатній кладці печі; Кутові коефіцієнти випромінювання: локалізація для діатермічного простору (звичайні) Для випромінюючого (поглинаючого) середовища з урахуванням проміжних тіл (узагальнені). Принципи замкнутості (closing - English) та взаємності при розрахунку теплообміну між окремими тілами. Температура печі. Визначення загального та локального теплових потоків на приймальну поверхню по температурі адіабатної цегляної кладки печі. **ПЗ 15 Селективність випромінювання газів в топках та печах.** Розрахунок теплообміну в системі з ***n*** селективно-випромінюючих поверхонь Селективне газове середовище та його вплив на окремі характеристики випромінювання, в т.ч. на випромінюючу здатність газового об'єму та системи в цілому.
	ПЗ 16 Сучасні тенденції удосконалення паливних печей та утилізаторів викидної теплоти. **Печі спрямованого теплообміну прямого та непрямого –печі НРН (косвенного радиационного нагрева КРН).** Використання високошвидкісних пальників з організацією рециркуляційних течій в робочому полум'яному просторі, печі з факелами, спрямованими на поверхню, що гріється (з імпактними струменями). Печі із спалюванням газу при збагаченні повітря киснем (системи oxy-fuel combustion). Утилізатори теплоти з посиленою радіаційною складовою – багатоходові рекуператори зі вставками– вторинними випромінювачами. Тепломасообмінні дво-та багатоступеневі утилізатори викидної теплоти паливних печей та котлів з використанням води та водяної пари в складі робочого тіла.
	ПЗ 17 Нагрів тонких тіл різної форми при постійній температурі печі з огляду інтенсифікації теплової роботи печі. Нестаціонарна теплопровідність. Нагрівання тонких тіл класичної форми (пластина, циліндр, шар) при постійній температурі печі. Нагрів тонких тіл довільної форми при постійній температурі печі.

	ПЗ 18 – 19 Прикладні задачі процесів теплової обробки матеріалів та виробів ***Частина 1:*** **Нагрівання (охолодження) масивних тіл класичної форми при постійній температурі печі.** *Розрахунки з використанням графічного представлення температурних функцій (критеріїв)* $\Theta = \phi\,(Fo, Bi)$ для основних локалізацій тіл. Час інерції. *Розрахунки для умов регулярного режиму.* *Розрахунки за методом теплової діаграми.* ***Частина 2:*** *Розрахунки з використанням формул для тонких тіл з внесенням поправок на масивність тіл.* Температурна та теплова (за тепловим потоком) діаграми нагрівання масивних тіл при постійній тепловій потужності печі. Особливості розрахунку печей в умовах конвективного та радіаційного теплообміну як як визначальних механізмів. Процеси теплообміну в умовах технологій нагрівання виробів при прямо-та протитоковому переміщенні теплоносія/виробів. *Нагрів при постійній тепловій потужності печі.*
	ПЗ 20 ***Теплофізичні засади та наслідки виникнення парникового ефекту та виникнення кліматичних змін (частини 1 та 2).*** Процеси горіння органічних та альтернативних палив як джерело забруднення атмосфери шкідливими викидами. Основні складові забруднення атмосфери: оксиди азоту та вуглецю, механізми їхнього утворення. Методи боротьби з утворенням карбонових викидів та місце водневих технологій у запобіганні карбонізації навколишнього середовища.

6. Рекомендований перелік лабораторних робіт (комп'ютерних практикумів)

Не передбачено.

7. Самостійна робота

Самостійна робота повинна бути спрямована на огляд наукової літератури щодо сучасного стану теорії паливних печей та інтенсифікації теплових процесів у високотемпературних енергоустановках.

8. Індивідуальні завдання

Індивідуальні завдання складаються з проведення розширених розрахунків по темам, що розглядаються на практичних заняттях для закріплення навиків.

Задачі та контрольні вправи, що будуть присутні також в екзаменаційних білетах:

1. *Якісно визначити вплив коефіцієнту надлишку повітря* λ *на ККД використання палива в «ідеальній» печі за умови за умови при його зміні від* λ = 1.05 *до* λ = 1.50 *проведення робочого процесу при температурі викидних газів* 100°C. *Паливо – природний газ (метан –* 95%; азот – 5 %).
2. *Визначити якісно підвищення ефективності використання палива в «ідеальній» печі при підігріві повітря-окислювача з холодного стану* ($t_{a,in}$ = 27°C)

до ($t'_a = 450^\circ C$) *для умов проведення процесу нагріву сталі в печі з робочою температурою 1000°С та варіювання надлишку повітря від* 1.05 *до* = 1.50.

3. *Розрахувати зміну об'ємних питомих викидів продуктів згоряння стехіометричної суміші метано - водневого газу з повітрям - окислювачем за умови зміни складу палива від* $[CH_4] = 100\%$ *до* $[H_2] = 100\%$:
   - *а) при незмінних об'ємних витрат палива;*
   - *б)при незмінній тепловій потужності пальника.(теплота згоряння* $[CH_4]$, МДж/кг: $Q^p_H = 50$; $Q^p_B = 55{,}5$; $[H_2]$, МДж/кг: $Q^p_H = 120$; $Q^p_B = 141{,}8$).
4. *Розрахувати результуючий тепловий потік випромінюванням у замкнутій системі з двох «сірих» тіл 1 та 2, якщо кутові коефіцієнти випромінювання* $\zeta_{11} > 0$; $\zeta_{22} > 0$, *причому для приймальної поверхні* 1 $\zeta_{11} = 0{,}3$ *кутовий коефіцієнт власний* $\varepsilon_1 = 0{,}8$; $\varepsilon_2 = 0{,}5$. *Розмір поверхонь*, м^2: $F_1 = 3$; $F_2 = 5$; *температури поверхні, К: випромінювальної* $T_2 = 1600$, *приймальної* $T_2 = 1300$.
5. *Визначити, як зміниться випромінювальна здатність факельної системи із завершеними продуктами згоряння в радіаційній трубі термічної печі діаметром 0,2 м при зміні палива з природного газу на коксовий газ. Спрощені склади палива, % об. : природний газ* $[CH_4] = 90$; $[C_2H_5] = 9{,}5$; $[C_3H_8] = 3{,}0$; $[N_2] = 3{,}5$; *коксовий газ:* $[H_2] = 55$; $[CH_4] = 25$; $[CO_2] = 18$; $[N_2] = 2$. *Температура газів всередині труби*
   $T_{tu} = 0{,}7\ T_T$, де T_T *– теоретична температура горіння паливо -повітряної суміші. Коефіцієнт надлишку повітря* $\lambda = 1{,}05$. (*Відповідні довідкові дані в графічній формі додаються*).
6. *Розрахувати кутові коефіцієнти випромінювання в циліндричному каналі з двома торцевими днищами при варіюванні довжини каналу*
   $0 \le l / d \le \infty$. *Визначити коефіцієнт діафрагмування та сумарні втрати теплоти через отвір входу випромінювання з печі в циліндричний канал.*
7. *Розрахувати питомі викиди парникових газів при спалюванні сумішевого газу MG* ($CH_4 + H_2$) *кг greenhouse gases / кг MG та кг GG/CP в залежності від складу MG – долі* $[H_2]$ *в сумішевому газі* (CH_4 / H_2). *В якості питомих викидів GG розглядаються:*
   – CO_2 : $D_{m,CO2}$, *кг* CO_2 / *кг CP*; – $CO_2 + H_2O$: $D_{m,CO2+H2O}$, *кг* ($CO_2 + H_2O$) / *кг CP. Діапазон варіювання* $[H_2]$: $0 \div 100\%$.
8. *З використанням моделі «зваженої суми сірих газів» для випромінювання продуктів згоряння оцінити, які наслідки слід очікувати для випромінювальної та поглинаючої здатності газів в пічному просторі за умов:*
   - *зміни палива з природного газу на водень, коксовий газ, коксо – доменний газ;*
   - *зміни окислювача з повітря на кисень (процес «oxy-fuel combustion»);*
   - *збільшення надлишку повітря з колостехіометричного співвідношення до коефіцієнту надлишку повітря* $\lambda = 1{,}5$.
9. *Розрахувати, як зміняться витрати палива – коксового газу, якщо коксовий газ, який спочатку використовувався осушеним, буде мокрим після*

очищення та перебувати в стані насичення при температурі 60°C. *Робоча температура процесу нагрівання металу, який обробляється в печі* – 1000 *температура*. *Коефіцієнт надлишку повітря – окислювача при спалюванні палива* – λ=1.1, *температура підігрітого в рекуператорі повітря* – 400°C, *відносна вологість повітря по відношенню до базової температури повітря* 30°C – 50% *стану, що відповідає насиченню повітря при* **17,5**°C.

10. Розглядається процес нагрівання двох партій (**A** та **B**) металу квадратного перерізу на монолітній подині зварювальної зони (зони 2) двозонної печі. В зоні підтримується постійний незмінний температурний режим незалежно від партії оброблюваного металу. Варіюванням температурного режиму зони 1 забезпечується підтримання температури поверхні металу на вході в зону 2. Властивості сталей для партій відрізняються тим, що коефіцієнт теплопровідності сталі **B** λ **= 0,05** λ **A**.

Визначити, як зміниться (*наскільки*) *зміниться необхідний час нагрівання сталевої заготовки партії* **B** *у порівнянні з партією* **A** *при збереженні температурної функції нагрівання*

$\emptyset = (t_{fur} - t_M) / (t_{fur} - t_{M,0})$ *для поверхні заготовок партії* **B** *в* зоні 2.

9. Засоби діагностики успішності навчання

Екзамен з навчальної дисципліни проводиться на останньому практичному занятті курсу і є усно-письмовим. Білети екзамену складаються з одного теоретичного та одного практичного завдання. Здобувачу не дозволяється користуватися ніякими додатковими матеріалами чи обладнанням, окрім ручки та паперу, який проштамповується і з якого здобувач може зачитувати відповіді.

До екзамену допускається здобувач, який виконав необхідні умови допуску до екзамену (див.розділ 10).

10. Рейтингова система оцінювання (РСО)

Рейтинг аспіранта з кредитного модуля складається з балів, що він отримує за поточну роботу на практичних семінарських заняттях та за виконання індивідуального завдання (з врахуванням штрафних та заохочувальних балів), всього максимально 100 балів:

<u>Робота на практичних (семінарських) заняттях:</u>

Ваговий бал – 10. Максимальна кількість балів на всіх практичних заняттях дорівнює 10 балів х 7 відповідей – 70 балів.

Критерії оцінювання

- «Відмінно», повна і вичерпна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 10 балів.
- «Добре», достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації) – 8 балів.
- «Задовільно», неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) – 6 балів.

- «Незадовільно», в усіх інших випадках – 0 балів.

Виконання індивідуального завдання:
Максимальна кількість балів складає – 30 балів.

Штрафні бали: знімається по 1 балу за відсутність без поважної причини на практичних заняттях або непідготовленість до них (максимально 5 балів).

Заохочувальні бали: додається по 1 балу за удосконалення дидактичного матеріалу, що відповідає одній лекції (практичному заняттю) курсу або активну участь у роботі на практичному занятті (максимально 5 балів). За участь у наукових конференціях додається 1 бал, виступу із доповіддю – 3 бали, публікацію статті – 5 балів (якщо загальна кількість балів рейтингу аспіранта з кредитного модуля вже досягла 100 балів, то заохочувальні бали не нараховуються).

Допуск до екзамену:

Аспірант допускається до екзамену у випадку, якщо за курс дисципліни на практичних семінарських заняттях набрано не менше 60 балів (з врахуванням штрафних та заохочувальних балів).

Максимальна кількість балів за складання екзамену складає – 100 балів.

Фінальний рейтинг (оцінка) за дисципліну складається з суми балів набраних за поточну роботу на практичних семінарських заняттях та за виконання індивідуального завдання (з врахуванням штрафних та заохочувальних балів) помножених на ваговий коефіцієнт 0,5 та оцінки за екзамен (за 100 бальною шкалою) помноженим на ваговий коефіцієнт 0,5 (всього максимально 100 балів).

Відповідність між балами шкали ECTS та традиційними оцінками:

Рейтинг	**Оцінка ECTS**	**Традиційна оцінка**
Від 95 до 100	A – відмінно	відмінно
Від 85 до 94	B – дуже добре	добре
Від 75 до 84	C – добре	
Від 65 до 74	Д – задовільно	задовільно
Від 60 до 64	E – достатньо	
Від 40 до 59	FX – незадовільно	незадовільно
Від 0 до 39	F – незадовільно, потрібна додаткова робота	Не допущено

11. Методичні рекомендації

Послідовність вивчення тем та їх розподіл узгоджуються із викладачами суміжних дисциплін. Строгість та детальність викладання розділів та тем навчальної програми вирішується відділом.

11.1 Методика вивчення кредитного модуля

На початку викладання лекційного матеріалу з нової теми бажано дати цілісну і повну характеристику розділу і теми, навести ключові слова і основні поняття, які розглядатимуться. Далі деталізувати матеріал, навести строгі означення, сформулювати принципи та положення з даної теми і, по можливості, обґрунтувати. Запропонувати аспірантам деякі факти обґрунтувати самостійно. Проілюструвати теоретичний матеріал прикладами. Звернути особливу увагу на ключові моменти обґрунтування.

11.2. Рекомендації, щодо забезпечення наочності навчальних занять

11.2.1. Для забезпечення наочності лекцій можливо навести приклади відповідних практичних застосувань стосовно матеріалу, що вивчається. Використовувати знаково-символічні засоби – формули, графіки, рисунки, що дає змогу виокремити суть предмета вивчення, тобто сприяє розвитку мислення й уяви.

11.2.2. На початку практичних занять необхідно повторити ключові означення і поняття з теоретичного матеріалу, користуючись конспектом лекцій, підручником чи посібником. Спираючись на приклади, наведені у лекціях, індивідуально розв’язувати задачі, які пропонує викладач зі збірників або методичних рекомендацій до практичних робіт. На початку або вкінці практичного заняття можливо провести невелику самостійну роботу. Результати оголосити на наступному занятті.

11.3. Застосування нових технологій навчання

Використання комп’ютерних технологій допоможе аспіранту у перевірці правильності виконання задач, а також пошуку додаткової інформації для їх розв’язування.

11.4. Використання методичних прийомів і засобів, рекомендацій щодо методики проведення занять

Доречно пропонувати аспірантам самостійно розглянути деякі питання теми лекції, вказати підручники та інформаційні ресурси, де можливо поглиблено ознайомитись з введеними поняттями, навести історичні факти, які призвели до появи нових понять.

Кожне практичне заняття проводиться тільки після розгляду відповідної теми на лекції. За спільного бажання аспірантів і лектора можливе проведення проблемної лекції або лекції у формі наукового диспута.

12.Рекомендована література

1. Сорока Б.С. Аналіз формування парникових викидів в атмосферу та утворення оксидів азоту при спалюванні метано-водневих сумішей. // *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2022, (3), 4-20. https://doi.org/10.33070/etars.3.2022.01
2. Сорока Б.С. Кліматичні та екологічні засади використання палива, що впливають на зміну тенденцій газопостачання в Європі та Україні. Частина 1. Сучасні вимоги до вибору газових палив. термодинамічна оцінка основних характеристик газового палива. // *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2023, *75*(2), 3-22. https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.01
3. Сорока Б.С., Згурський В.О., Кудрявцев В.С. Скорочення викидів CO2 при спалюванні природного газу з повітрям, збагаченим киснем, як засіб попередження парникового ефекту в атмосфері. // *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 2023, *77*(4), 3-19. https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.01
4. Сорока Б.С., Згурський В.О., Кудрявцев В.С. Кліматичні та екологічні засади використання палива, що впливають на зміну тенденцій газопостачання в Європі та Україні. Частина 2. Забезпечення ефективності використання палива в умовах декарбонізації довкілля. // *Енерготехнології та ресурсозбереження, 2024,* 79(2), 3-23. https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.01
5. Wunning J.G., Milani A. Handbook of Burner Technology for industrial furnaces. Fundamentals ǀ Burner ǀ Applications. Second Edition. Vulkan Verlag. Essen. – 2015.
6. Hottel H.C., Sarofim A.F. Radiative Transfer. New York etc.: McGraw Hill, – 1967.
7. Beneke F., Nacke B., Pfeifer H. Handbook of thermoprocessing technologies. Volume 1: Fundamental ǀ Processes ǀ Calculations. Second Edition. Vulkan Verlag. Essen. – 2012.
8. Beneke F., Nacke B., Pfeifer H. Handbook of thermoprocessing technologies. Volume 2: Pants ǀ Components ǀ Safety. Second Edition. Vulkan Verlag. Essen. – 2015.
9. Soroka B. Development of Combined Power and Environmental Fundamentals of Natural Gas Substitution for Alternative Combustible Gases, *International Journal of Energy for a Clean Environment*, vol. 14, №. 2-3, pp. 91-114, 2013. DOI: https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2014006741