



ПРОЦЕСИ ТЕПЛООБМІНУ В ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВКАХ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Галузь знань	14 Електрична інженерія
Спеціальність	144 Теплоенергетика
Освітня програма	ОПП Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій
Статус дисципліни	Вибіркова
Форма навчання	очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	5 кредитів, 150 годин
Семестровий контроль/ контрольні заходи	екзамен
Розклад занять	Лекційні заняття – один раз на тиждень; практичні заняття – один раз на два тижні
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: укр.мова - к.т.н, доц. Притула Наталя Олександрівна, prytula.natalia@lil.kpi.ua Практичні: к.т.н, доц. Притула Наталя Олександрівна, prytula.natalia@lil.kpi.ua
Розміщення курсу	https://campus.kpi.ua/ https://classroom.google.com/c/NTkyMjExNDcwODY4?cjc=kx17fh7

Програма навчальної дисципліни

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

Предметом освітнього компонента «Процеси теплообміну в високотемпературних теплотехнологічних установках» є сукупність властивостей узагальненого об'єкта навчання (високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки). Створення теплотехнічних умов для здійснення високотемпературних процесів різних галузях виробництва: вибір палива, метод його спалювання, забезпечення високої ефективності нагрівання матеріалу, що обробляється, найбільш повне і економічне використання вторинних енергетичних ресурсів та продовження робочого циклу установок.

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

- 1 Здатність застосовувати відповідні кількісні математичні, наукові і технічні методи і комп'ютерне програмне забезпечення для розрахунку процесів теплообміну в високотемпературних теплотехнологічних установках
- 2 Здатність застосовувати знання процесів теплообміну в високотемпературних теплотехнологічних установках у практичних ситуаціях.
- 3 Здатність виявляти, класифікувати і описати ефективність систем і компонентів на основі використання аналітичних методів і методів

моделювання в теплоенергетичній галузі.

Згідно з вимогами освітньо-наукової програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни «Процеси теплообміну в високотемпературних теплотехнологічних установках» мають продемонструвати такі **програмні результати навчання**:

- 1 Вміти проводити розрахунки зовнішнього та внутрішнього теплообміну у високотемпературних теплотехнологічних установках
- 2 Вміти проводити аналіз ефективності роботи високотемпературних теплотехнологічних установках та розробляти засоби з енергозбереження.
- 3 Вміти використовувати знання з конструкції високотемпературних установок та високотемпературних процесів в них для проектування та експлуатації теплоенергетичного обладнання.
- 4 Вміти визначати основні технічні характеристики та режими роботи високотемпературних установок.

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

Для вивчення кредитного модуля «Процеси теплообміну в високотемпературних теплотехнологічних установках» необхідні знання в області технічної термодинаміки, тепломасообміну, теплотехнологічні процеси та установки, паливо та обладнання для його спалювання, використання вторинних енергоресурсів. В свою чергу, знання в області високотемпературних теплотехнологічних процесів та установок використовуються далі при виконанні магістерської дисертації.

3. Зміст навчальної дисципліни

Вступ

Розділ 1. Загальні відомості про високотемпературні установки.

Тема 1.1. Призначення ВТУ. Загальна схема ВТУ та призначення її окремих елементів.

Тема 1.2. Класифікація промислових печей.

Розділ 2. Особливості спалювання палива в ВТУ.

Тема 2.1. Загальні відомості. Гомогенне, ламінарне та турбулентне горіння палива.

Тема 2.2. Особливості спалення газоподібного, рідкого та твердого палива в ВТУ.

Пилевугільне спалення палива.

Тема 2.3. Вибір пальників, їх кількість та місце розташування в ВТУ.

Розділ 3. Теплообмін в ВТУ.

Тема 3.1. Організація теплопередачі в ВТУ. Зовнішній та внутрішній теплообмін.

Тема 3.2. Види теплообміну у робочому просторі ВТУ.

Розділ 4. Рух газів та матеріалів в ВТУ.

Тема 4.1. Види руху газів в ВТУ. Аеродинаміка вільного зануреного струменю.

Тема 4.2. Вибір обладнання для подавання повітря та відводу продуктів згорання в ВТУ.

Види руху матеріалів в ВТУ.

Розділ 5. Теплові та матеріальні баланси промислових печей та визначення витрат палива.

Тема 5.1. Теплові баланси ВТУ та визначення витрат палива.

Тема 5.2. Матеріальні баланси ВТУ. Питомі витрати палива та засоби їх зменшення.

Розділ 6. Регенерація теплоти відхідних газів від ВТУ.

Автономний високотемпературний підігрів повітря.

Тема 6.1. Способи підігріву компонентів горіння палива та їх ефективність.

Тема 6.2. Особливості розрахунків регенераторів та рекуператорів в ВТУ.

Тема 6.3. Особливості конструкцій та пристроїв для утилізації теплоти продуктів згорання палива.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

1. Ткаченко О.О. Високотемпературні процеси та установки: Підруч. - К.: А.С.К., 2005. - 480 с.
2. Костюк О. П. Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки. Навчальний посібник. - Рівне: НУВГП, 2013. - 182 с.

Допоміжна література

1. Ткаченко С. Й. Високотемпературні процеси та установки. Теорія, практика, самостійна та індивідуальна робота студентів / С. Й. Ткаченко, М. М. Чепурний, Л. А. Боднар. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 111 с.
2. Методичні вказівки до проведення практичних занять з курсу “Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки” для. Студентів денної та заочної форм навчання спеціальності “Теплоенергетика ”/Уклад. Анцев Б.В., Безродний М.К., Приходько М.А,- Київ-Рівне, 2005. – 68с.

Рекомендації

Сайт наукової бібліотеки НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» <http://library.kpi.ua> в розділі «Електронні ресурси», підрозділі «Загальний електронний каталог НТБ» дозволяє знайти та замовити рекомендовану літературу до навчальної дисципліни та отримати доступ до електронних ресурсів бібліотеки та роботи з ними

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Опанування навчальної дисципліни базується на попередньому опрацюванню матеріалу кожної лекції, що надсилається викладачем заздалегідь, з подальшим опитуванням і детальним розглядом окремих питань під час проведення лекції або зустрічі при дистанційному режимі навчання. Крім того, в рамках проведення практичних занять, студентам видаються індивідуальні завдання для попереднього їх вирішення і обговорення в рамках часу, передбаченого розкладом практичних занять.

Лекційні заняття

№ з/п	Назва теми лекції та перелік основних питань (перелік дидактичних засобів, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	Лекція 1. Вступ. Загальні відомості про промислові печі. Значення, зміст дисципліни та основні шляхи підвищення ефективності використання ВТУ. Призначення ВТУ. Загальна схема ВТУ та призначення її окремих елементів. Класифікація ВТУ. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
2	Лекція 2. Принципові схеми промислових печей, їх конструктивні та теплові властивості. Тунельні та шахтні печі. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
3	Лекція 3. Принципові схеми промислових печей, їх конструктивні та теплові властивості. Камерні нагрівальні та плавильні печі. Мартеновські печі. Принципові схеми промислових печей, їх конструктивні та теплові властивості. Плавильні печі. Обертові печі.

	Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
4	Лекція 4. Загальні відомості. Гомогенне, ламінарне та турбулентне горіння палива в ВТУ. Особливості спалювання газоподібного, рідкого (мазуту) та твердого палива (кускового та пилоподібного) в ВТУ. Класифікація пальників та область їх використання (повтор). Вибір пальників, їх кількості та місця розташування в ВТУ їх призначення з точки зору теплообміну та руху продуктів згорання. Радіаційні труби. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
5	Лекція 5. Організація теплопередачі в ВТУ. Зовнішній та внутрішній теплообмін та його особливості. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
6	Лекція 6. Теплопередача в печах з великим об'ємом робочого простору. Рівномірно розподілений зовнішній теплообмін в робочому просторі печі. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
7	Лекція 7. Критеріальний розрахунок зовнішнього теплообміну у робочих камерах ВТУ. Направлений непрямий радіаційний теплообмін. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
8	Лекція 8. Конвективний і конвективно-радіаційний режими зовнішнього теплообміну. Зовнішній теплообмін в щільному (фільтруючому), падаючому та киплячому шарі матеріалу. Внутрішній теплообмін. Розрахунок нагріву виробів в печі з постійною температурою. ($T_{п} = \text{const}$). Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
9	Лекція 9. Зовнішній теплообмін в щільному (фільтруючому), киплячому шарі матеріалу і псевдогазовому шарі. Печі з щільним (фільтруючим) шаром (шахтні печі). Зовнішній теплообмін в киплячому або псевдорозрідженому шарі. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
10	Лекція 10. Розрахунки зовнішнього та внутрішнього теплообміну у високотемпературних теплотехнологічних установках. Процес нагріву матеріалів і виробів у нагрівальних печах складається із зовнішнього і внутрішнього теплообміну. Обидва процеси протікають одночасно і взаємопов'язані. Задачу нагріву матеріалу можна визначити лише шляхом одночасного розгляду обох цих процесів. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
11	Лекція 11. Внутрішній теплообмін - нагрів масивних тіл. Нагрів тіла в середовищі з постійною температурою. Нагрів тіла в середовищі при умові передачі на його поверхню постійного теплового потоку $q_{п} = \text{const}$. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
12	Лекція 12. Рух газів в печах. Рециркуляція продуктів згорання як засіб регулювання температури та підвищення теплової ефективності печей. Види руху газів у робочому просторі ВТУ. Аеродинаміка вільного зануреного струменю. Вибір обладнання для подавання повітря та відводу продуктів згорання в ВТУ. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
13	Лекція 13. Лекція 15. Матеріальні баланси ВТУ. Питома витрата палива та засоби її зменшення. Складання теплового балансу ВТУ та визначення витрати палива. Приклад теплового балансу (розподілу теплоти). Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
14	Лекція 14. Основи регенеративного тепловикористання в високотемпературних установках. Техніко-економічні і експлуатаційні межі нагріву повітря. Автономний високотемпературний нагрів повітря. Способи нагріву компонентів горіння. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
15	Лекція 15. Регенератори і рекуператори для нагріву повітря і газу. Особливості розрахунку металевих рекуператорів

	Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
16	Лекція 16. Конструкційні та технологічні матеріали високотемпературних установок. Вплив стійкості конструкції на показники роботи ВУ. Конструкційні металеві матеріали. Загальні властивості та особливості мінеральних матеріалів Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
17	Лекція 17. Конструкційні та технологічні матеріали високотемпературних установок. Вогнетривкі матеріали та вироби. Загальні характеристики вогнетривів. Властивості вогнетривів. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.
18	Лекція 18. Конструкційні та технологічні матеріали високотемпературних установок. Фізичні властивості вогнетривів. Короткі дані про технології виробництва та застосування вогнетривів. Завдання на СРС: Підготовка до лекції.

Практичні заняття

Основним завданням циклу проведення практичних занять є закріплення студентами лекційної частини дисципліни.

№ з/п	Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)
1	Заняття 1. Теплообмін в високотемпературних установках з великим об'ємом вільного простору (зовнішній теплообмін). Приведена степінь чорноти і приведений коефіцієнт випромінювання робочого простору. Теплообмін при рівномірно-розсереджених джерелах випромінювання. Завдання на СРС: Підготовка до наступного практичного заняття.
2	Заняття 2. Теплообмін в високотемпературних установках з великим об'ємом вільного простору (зовнішній теплообмін). Визначення температури відхідних продуктів згорання із робочого простору з використанням критерій Больцмана. Завдання на СРС: Підготовка до наступного практичного заняття.
3	Заняття 3. Теплообмін в шарі кускового та зернистого матеріалу. Внутрішній теплообмін. Нагрів матеріалу з постійною швидкістю по закону $t_m = \theta \cdot \tau$
4	Заняття 4. Внутрішній теплообмін. Нагрів матеріалу при постійній температурі в робочому просторі $T_{\text{печі}} = \text{const}$. 3.3. Визначення часу нагріву матеріалу в методичній печі Завдання на СРС: Підготовка до наступного практичного заняття.
5	Заняття 5. Рециркуляція продуктів згорання палива як засіб регулювання температури Калориметрична температура горіння палива з врахуванням рециркуляції продуктів згорання Завдання на СРС: Підготовка до наступного практичного заняття.
6	Заняття 6. Теплові і матеріальні баланси високотемпературних установок. Втрати теплоти через стінки. Втрати теплоти через відкриті лючки і вікна. Завдання на СРС: Підготовка до наступного практичного заняття.
7	Заняття 7. Регенерація теплоти газів, які відходять від високотемпературних установок Особливості розрахунку металевого рекуператора по безрозмірним температурам. Завдання на СРС: Підготовка до наступного практичного заняття.
8	Заняття 8. Коефіцієнт регенерації теплоти матеріалу, що пройшов термообробку. Завдання на СРС: Підготовка до наступного практичного заняття.
9	Заняття 9. Теплообмін у паливних високотемпературних установках. Завдання на СРС: Підготовка до наступного практичного заняття.

6. Самостійна робота аспіранта

№ з/п	Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання	Кількість годин СРС
1	Конструктивні елементи високотемпературних установок	5
2	Енергетичне удосконалення паливних високотемпературних установок	5
3	Парогенератори на відхідних технологічних газах	5
4	Підготовка до лекційних та практичних занять	16
5	Підготовка до модульних контрольних робіт	15
6	Виконання РР	20
7	Підготовка до екзамену	30
8	Всього	96

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

При вивченні курсу студенту необхідно під'єднатися до створеного Google Classroom. В ньому буде викладатися в електронному вигляді вся необхідна базова література, методичні вказівки.

На початку вивчення дисципліни видається індивідуальне завдання на Розрахунково роботу. Студент виконує РР протягом семестру і надсилає виконану роботу до встановленого терміну (ближче до кінця семестру) в електронному вигляді в Google Classroom. Після перевірки РР відбувається її захист.

На першому занятті коротко викладаються основи академічної доброчесності, а заходи з підтримки принципів академічної доброчесності використовується протягом вивчення дисципліни (на основі курсу «Академічна доброчесність: онлайн-курс для викладачів», Prometheus).

Система вимог до студентів:

- обов'язкова присутність на лекціях і практичних заняттях за розкладом;
- попереднє опрацювання матеріалу лекцій;
- самостійне вирішення індивідуальних завдань;
- доопрацювання завдань з урахуванням результатів перевірки і зроблених зауважень.

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

Види контролю знань студентів з дисципліни:

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

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

1) дев'ять відповідей в середньому кожного студента на лекційних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно п'ять студентів; при середній чисельності групи 10 осіб і вісімнадцяти лекційних заняттях (36 годин) отримуємо: $5 \cdot 18/10 \approx 9$ відповідей);

2) дев'ять відповідей в середньому кожного студента на практичних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно п'ять студентів; при середній чисельності групи 10 осіб і дев'яти практичних заняттях (18 годин) отримуємо: $5 \cdot 9/10 \approx 5$ відповідей);

3) виконання РГР;

4) виконання трьох завдань СРС (див. п.6);

5) виконання МКР (дві частини);

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: $r_1 = 1 \text{ бал} \times 9 = 9$ балів.

Критерії оцінювання:

1 бал – повна вірна відповідь на поставлене запитання; 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: $r_2 = 2 \text{ бал} \times 5 = 10$ 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 – 3. Максимальна кількість балів студента – 9 (завдання СРС видаються після проходження відповідної теми лекційного заняття, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень): $r_4 = 3 \text{ бал} \times 3 = 9$ балів. Виконане завдання надається викладачу у вигляді конспекту, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

3 бали – виконання завдання СРС вчасно та у повному об'ємі, охайне оформлення; 2 бали – текст відповідь має несуттєві помилки, неохайне оформлення; 1 бал – відповідь має деякі помилки, завдання СРС виконано не у повному об'ємі; 0 балів – завдання СРС не виконано.

Заохочувальні бали:

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

4. Виконання завдань РР

Ваговий бал – 12. Максимальна кількість балів студента – 12 (завдання РР видається після проходження відповідної теми лекційного заняття). Виконане завдання надається викладачу у вигляді звіту.

Критерії оцінювання:

12 балів – виконання завдання РР вчасно та у повному об'ємі, охайне оформлення; 11...7 балів – відповідь має несуттєві помилки, неохайне оформлення; 6...1 балів – відповідь має грубі помилки, завдання виконано не у повному об'ємі; 0 балів – завдання РР не виконано.

Заохочувальні бали:

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

5. Модульна контрольна робота (МКР)

Проводиться дві частини МКР. Кожна частина МКР складається із десяти тестових завдань. Ваговий бал кожної частини – 10. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює $r_5 = 10 \times 2 = 20$ балів.

Критерії оцінювання:

10 балів – повна вірна відповідь на всі тестові завдання; 9...1 бали – наявність неповних та/або невірних відповідей на тестові завдання; 0 балів – відсутність відповіді, МКР не зараховано.

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 виконане 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.

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: $R_c = 9+10+9+12+20 = 60$ балів.

Необхідною умовою допуску до екзамену є позитивна оцінка з виконання всіх завдань СРС, захист розрахункової роботи та стартовий рейтинг не менше $0,4 \times R_c = 24$ балів.

Студенти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж 24 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

$$R_D = R_c + R_E = 60 + 40 = 100 \text{ балів.}$$

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. Студентам, 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 освітнього компонента (силабус):

Складено к.т.н., доц. Притула Наталя Олександрівна

Ухвалено кафедрою теплової та альтернативної енергетики (протокол № 17 від 12.04.23 р.)

Погоджено Методичною комісією Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики (протокол № 8 від 08.05.2023 р.).