



# ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА - 2

## ТЕРМОДИНАМІКА НЕРУХОМИХ СИСТЕМ

### Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

#### Реквізити навчальної дисципліни

|                                             |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рівень вищої освіти                         | <i>Перший (бакалавр)</i>                                                                                                                                                                                                                                 |
| Галузь знань                                | <i>14 Електрична інженерія</i>                                                                                                                                                                                                                           |
| Спеціальність                               | <i>144 Теплоенергетика</i>                                                                                                                                                                                                                               |
| Освітня програма                            | <i>ОНП Теплоенергетика</i>                                                                                                                                                                                                                               |
| Статус дисципліни                           | <i>Нормативна</i>                                                                                                                                                                                                                                        |
| Форма навчання                              | <i>Очна (денна)/ заочна</i>                                                                                                                                                                                                                              |
| Рік підготовки, семестр                     | <i>2курс, осінній семестр</i>                                                                                                                                                                                                                            |
| Обсяг дисципліни                            | <i>5 кредитів, 150 годин</i>                                                                                                                                                                                                                             |
| Семестровий контроль/ контрольні заходи     | <i>залік</i>                                                                                                                                                                                                                                             |
| Розклад занять                              | <i>Лекційні заняття – один раз на тиждень; практичні заняття – один раз на тиждень.</i>                                                                                                                                                                  |
| Мова викладання                             | <i>Українська</i>                                                                                                                                                                                                                                        |
| Інформація про керівника курсу / викладачів | Лектори: <i>к.т.н, доц. Соломаха Андрій Сергійович, as_solomaha@ukr.net</i><br>Практичні: <i>к.т.н, доц. Соломаха Андрій Сергійович, as_solomaha@ukr.net</i>                                                                                             |
| Розміщення курсу                            | <i><a href="https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&amp;sd=10188&amp;cm=38240&amp;rcms=18883&amp;ssm=cm&amp;tree_list=">https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&amp;sd=10188&amp;cm=38240&amp;rcms=18883&amp;ssm=cm&amp;tree_list=</a></i> |

#### Програма навчальної дисципліни

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

**Метою** вивчення та засвоєння студентами навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка –

1. Термодинаміка нерухомих систем» є формування у студента таких компетенцій:

- Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями;
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
- Здатність працювати в команді;
- Здатність приймати обґрунтовані рішення;
- Здатність виявляти, класифікувати і оцінювати ефективність систем і компонентів на основі використання аналітичних методів і методів моделювання в теплоенергетичній галузі;
- Здатність забезпечувати якість в теплоенергетичній галузі;
- Здатність аналізувати методи та засоби підвищення теплової економічності енергетичного обладнання теплових та атомних електростанцій; визначати шляхи модернізації теплової схеми з метою підвищення економічності та надійності роботи теплових та атомних електростанцій;
- Здатність розробляти і реалізовувати заходи з підвищення рівня енерго-екологічної ефективності при проектуванні та експлуатації теплоенергетичного обладнання, аналізувати схеми теплоенергетичних і теплотехнологічних установок та процесів з

урахуванням вимог безпеки і сучасних тенденцій розвитку енергетики в залежності від призначення і типу палива, яке використовується;

- Здатність розробляти оптимальні конструкції та експлуатаційні режими теплообмінного обладнання; оцінювати ефективність і загальну економічність використання різних видів ВЕР, нетрадиційних джерел енергії, об'єктів з теплонасосними системами теплопостачання.

**Предметом<sup>1</sup>** навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка – 1. Термодинаміка нерухомих систем» є фізична сутність та закономірності процесів енергетичних, в основному тепломеханічних, взаємодій і перетворень, а також пов'язаними з цими процесами властивостей робочих тіл.

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

- |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПРН2  | 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.. |
| ПРН5  | Обирати і застосовувати придатні типові аналітичні, розрахункові та експериментальні методи; правильно інтерпретувати результати таких досліджень.                                                                                                                                         |
| ПРН11 | Мати лабораторні / технічні навички, планувати і виконувати експериментальні дослідження в теплоенергетиці за допомогою сучасних методик і обладнання, оцінювати точність і надійність результатів, робити обґрунтовані висновки                                                           |
| ПРН12 | Розуміти основні методики проектування і дослідження в теплоенергетиці, а також їх обмеження.                                                                                                                                                                                              |
| ПРН13 | Розуміти ключові аспекти та концепції теплоенергетики, технології виробництва, передачі, розподілу і використання енергії.                                                                                                                                                                 |
| ПРН19 | Володіти необхідним науковим підґрунтям, методиками та методами планування та здійснення експериментальних досліджень теплового устаткування теплоенергетичних об'єктів муніципальної, промислової сфер та електростанцій.                                                                 |

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

Для вивчення дисципліни «Технічна термодинаміка» необхідні знання в області фізики (шифр за ОПП – ЗО 2), хімії (шифр за ОПП – ЗО 8), вищої математики (шифр за ОПП – ЗО 1), гідрогазодинаміки (шифр за ОПП – ЗО 12) та тепломасообміну (шифр за ОПП – ЗО 15). В свою чергу, знання в області «Технічна термодинаміка» використовуються далі в тепломасообміні (шифр за ОПП – ЗО 15), Теплові електричні станції, Теплові насоси та їх використання, Нагнітачі та теплові двигуни, а також при підготовці дипломних проектів бакалавра.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

### **Розділ 8. Ексергетичний аналіз термодинамічних явищ**

Тема 8.1. Ексергія – міра якості енергоресурсів

Тема 8.2. Вплив необоротностей на втрати ексергії

### **Розділ 9. Основи теорії тепломеханічних циклів теплосилових установок.**

Тема 9.1 Поняття про ТСУ

Тема 9.2 Простий ідеальний цикл ТСУ

---

<sup>1</sup> Для нормативних дисциплін зазначається згідно матриці відповідності програмних компетентностей та результатів навчання в освітній програмі.

Тема 9.3 Реальний простий цикл ТСУ

#### **Розділ 10. Паросилові цикли та установки**

Тема 10.1. Простий паросиловий цикл

Тема 10.2. Удосконалення циклів ПСУ

Тема 10.3. Термодинамічні основи теплофікації

Тема 10.4. Цикли АЕС

Розрахунково-графічна робота Розд. 9, 10

#### **Розділ 11. Газосилові та комбіновані цикли і установки**

Тема 11.1. Термодинамічні основи теорії нагнітання

Тема 11.2. Цикли ГТУ і методи підвищення їх ефективності

Тема 11.3. Цикли ДВС і реактивних двигунів

Тема 11.4. Комбіновані цикли теплосилових установок

#### **Розділ 12. Течія газів і пари**

Тема 12.1. Адіабатна течія в соплах і дифузорах

Тема 12.2. Дроселювання газів і пари

#### **Розділ 13. Цикли холодильних і теплонасосних установок**

Тема 13.1. Загальні відомості про ХУ та ТНУ.

Тема 13.2 Цикли повітряної та парокомпресорної холодильних установок

Тема 13.3 Теплонасосні установки

### **4. Навчальні матеріали та ресурси**

#### **Базова література**

1. Трокоз Я.Є., Куделя П.П. Текст лекцій з дисципліни «Технічна термодинаміка». Частина 1., Київ, 2015.
2. Трокоз Я.Є., Куделя П.П. Текст лекцій з дисципліни «Технічна термодинаміка». Частина 2., Київ, 2015.
3. Технічна термодинаміка в прикладах і задачах [Електронний ресурс]: Навчальний посібник / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Електрон. текстові дані, 77 сторінок
4. Буляндра, О. Ф. Технічна термодинаміка : підруч. для студентів енерг. спец. вищ. навч. закладів / О. Ф. Буляндра. – К.: Техніка, 2001. – 320 с.: іл. – Бібліогр.: с. 315.
5. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Студия «Негоциант». – 2006. – 712 с.
6. А. А. Александров. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок, Москва, 2004.
7. Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar. Thermodynamics: an engineering approach, eighth edition, eight edition, 2015.
8. Michael J. Moran, howard n. Shapiro, daisie d. Boettner, margaret b. Bailey. Fundamentals of engineering thermodynamics, 8 edition, 2014.

#### **Допоміжна література**

1. Куделя П.П. Методи термодинамічного аналізу установок та систем. – Київ, 2010. Свідоцтво про надання грифа електронному виданню НМУ № Е9/10-150, протокол №5 від 21.01.2010. – 127 с.
2. Низькоексергетичні опалювальні системи / П.П.Куделя, А.С. Соломаха. – К.:НТУУ «КПІ», 2015. – 153 с.: іл. – Бібліогр.: с.149-153
3. Hans Dieter Baehr, Stephan Kabelac Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen. 2012
4. Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag. Fundamentals of thermodynamics seventh edition, 2009

## 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)

##### Лекційні заняття

| № з/п | Назва лекцій та перелік основних питань<br>(перелік дидактичних засобів, посилання на літературу<br>та завдання на СРС)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1.    | <b>Основні відомості про енергетичні, ексергетичні та матеріальні баланси стаціонарних поточних процесів.</b><br>Енергоресурси поточних систем. Роботоздатність поточних тепломеханічних систем. Рівняння Гюї-Стодоли.<br>Самостійна робота.<br>Ексергія і анергія різних енергоресурсів системи. Ексергетичний баланс поточних процесів та його складові. Показники ефективності процесів, ексергетичний к.к.д. Вплив необоротностей на втрати ексергії при спалюванні палив, в процесах теплообміну при кінцевій різниці температур між тілами та внаслідок тертя в робочому тілі. |
| 2.    | <b>Основи теорії тепломеханічних циклів.</b><br>Поняття про тепломеханічні цикли (ТМЦ) та теплосилові установки (ТСУ).<br>Класифікація циклів по прояву необоротностей. Простий ідеальний цикл та оцінка його ефективності по енергетичним показникам.<br>Самостійна робота.<br>Реальний тепломеханічний цикл. Література: Електронний конспект лекцій                                                                                                                                                                                                                               |
| 3.    | <b>Оцінка ефективності реального простого циклу.</b><br>Внутрішні та зовнішні необоротності. Оцінка внутрішніх необоротностей за допомогою відносного внутрішнього к.к.д. циклу $\eta^{TMЦ}_{oc}$ . Основні способи підвищення ефективності циклів.<br>Самостійна робота.<br>Залежності $\eta_i = f(\eta_i, \eta_{oi}^{TMЦ})$ та $\eta_{oi}^{TMЦ} = f(\eta_{oi}^T, \eta_{oi}^H, \varphi_i)$ вивід та аналіз впливу необоротностей.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                                                                        |
| 4.    | <b>Простий цикл паросилової установки.</b><br>Загальні відомості про ПСУ (ТЕС і АЕС). Простий ідеальний та реальний цикл ПСУ - цикл Ренкіна, його особливості та характеристики.<br>Самостійна робота:<br>Органічний цикл Ренкіна.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 5.    | <b>Вплив параметрів робочого тіла на ефективність простого циклу.</b><br>Вплив початкових і кінцевих параметрів робочого тіла на ефективність циклу Ренкіна. Спряжені початкові параметри та їх визначення.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | <p>Самостійна робота:</p> <p>Цикл з проміжним (повторним) перегрівом пари.</p> <p>Цикл з проміжним перегрівом пари як засіб підвищення початкового тиску пари.</p> <p>Вибір тиску для процесу повторного перегріву.</p> <p>Література: електронний конспект лекцій, (Л1), с.314-315; (Л6), с.356-359; (Л1д), с.464-467</p>                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 6.  | <p><b>Енергетичні та ексергетичні баланси простої паросилової установки (ПСУ).</b></p> <p>Схема простої паросилової установки. Енергетичні та ексергетичні баланси парогенератора (ПГ). Енергетичний к.к.д. ПГ. Основні причини втрати ексергії в ПГ. Турбогенератор, абсолютна внутрішня потужність турбіни, ефективна потужність турбіни, електрична потужність електрогенератора. Відносний електричний к.к.д. турбогенератора. Ексергетичні та енергетичні характеристики ефективності ТСУ.</p> <p>Самостійна робота.</p> <p>Особливості проміжного перегріву пари в циклах АЕС.</p> |
| 7.  | <p><b>Регенеративні цикли ПСУ.</b></p> <p>Поняття про регенерацію. Ідеальний регенеративний цикл. Регенеративний цикл з ступеневим підігрівом живильної води. Аналіз впливу температури живильної води і кількості регенеративних підігрівачів на ефективність регенеративного циклу.</p> <p>Самостійна робота:</p> <p>Цикл ПСУ з двома регенеративними підігрівачами змішуючого типу.</p>                                                                                                                                                                                               |
| 8.  | <p><b>Термодинамічні основи теплофікації.</b></p> <p>Комбіноване виробництво теплоти і електроенергії на ТЕЦ, термодинамічне обґрунтування. Основні схеми ТЕЦ. Теплофікація і екологія.</p> <p>Самостійна робота.</p> <p>Когенерація, тригенерація</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 9.  | <p><b>Поняття про комбіновані цикли.</b></p> <p>Вплив термодинамічних властивостей РТ на ефективність циклу. Вибір РТ з високими критичними параметрами. Парогазовий цикл (ПГУ).</p> <p>Література: електронний конспект лекцій</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 10. | <p><b>Термодинамічні основи теорії нагнітання</b></p> <p>Рівняння теорії нагнітання. Загальна характеристика процесу нагнітання.</p> <p>Основне рівняння теорії нагнітання. Залежність роботи на нагнітання від характеру процесу. Часткові процеси нагнітання.</p> <p>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції - одноступінчатого та багатоступінчатого нагнітання.</p>                                                                                                                                                                                                        |
| 11. | <p><b>Багатоступінчатого нагнітання</b></p> <p>Робота нагнітання одноступінчатого компресора в ізотермічному, адіабатному і політропному процесах. Багатоступінчатого нагнітання. Оптимальний розподіл тисків по ступенях.</p> <p>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 12. | <p><b>Цикли газотурбінних установок</b></p> <p>Простий цикл ГТУ.</p> <p>Загальні відомості про ГТУ. Цикл ГТУ з ізобарним підведенням теплоти.</p> <p>Тепломеханічний коефіцієнт ідеального циклу ГТУ, залежність його від ступені підвищення тиску. Відношення роботи компресора до роботи турбіни в ідеальному циклі. Вплив необоротності адіабатних процесів стиснення і</p>                                                                                                                                                                                                           |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | розширення на показники ефективності реального циклу ГТУ.<br>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 13. | <b>Методи підвищення к.к.д. циклів ГТУ.</b><br>Підвищення початкової температури газу перед турбіною. Оптимальна ступінь підвищення тиску. ГТУ з регенеративним підігрівом і багатоступінчатим стисненням та розширенням робочого тіла. Замкнуті схеми ГТУ.<br>Самостійна робота.<br>Цикли ДВЗ і реактивних двигунів.<br>Цикли ДВЗ. Ідеальні цикли ДВЗ з ізохорним, ізобарним і з мішаним підведенням теплоти. Аналіз факторів, які впливають на ефективність циклів ДВС. Реальні цикли ДВЗ. Поняття про цикли прямооточних, турбореактивних і реактивних двигунів.                                                                                                                                                         |
| 14. | <b>Комбіновані цикли теплосилових установок.</b><br>Переваги і недоліки водяної пари як робочого тіла в ТСУ. Цикли енергетичних установок на не водяних парах. Термодинамічні основи комбінування циклів ТСУ з різними робочими тілами. Бінарні цикли. Цикли парогазових установок. Оцінка ефективності комбінованих циклів. Принципові схеми комбінованих ТСУ. Цикл МГД - генератора.<br>Самостійна робота.<br>Цикл МГД - генератора.                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 15. | <b>Термодинаміка потоку.</b><br>Основні закономірності потоків робочих тіл.<br>Загальні відомості. Застосування 1-го і 2 -го законів термодинаміки до адіабатних поточних процесів . Рівняння нерозривності. Температура гальмування. Рівняння для визначення швидкості і витрати робочого тіла.<br>Самостійна робота<br>Рівняння геометричного впливу на потік газу і пари.<br>Виведення рівняння. Швидкість звуку. Число Маха.<br>Аналіз рівняння. Умови переходу через швидкість звуку, криза течії.<br>Розрахункові характеристики кризи течії.<br>Витікання через прості сопла і сопла Лавалю.<br>Особливості витікання із простого сопла. Розрахунок простого сопла і сопла Лавалю при відсутності і наявності тертя. |
| 16. | <b>Дроселювання газів і пари.</b><br>Характеристика і особливості процесу дроселювання. Характер зміни температури при дроселюванні ідеальних і реальних газів. Диференціальний і інтегральний дросель-ефект реальних газів. Температура інверсії. Технічне застосування процесу дроселювання водяної пари.<br>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 17. | <b>Зворотні цикли.</b><br>Загальні відомості. Застосування 1-го та 2-го законів термодинаміки до зворотних циклів і основні висновки. Оборотний цикл Карно для холодильних і теплонасосних установок. Ідеальний зворотний цикл Карно.<br>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 18. | <b>Особливості реалізації зворотних циклів та вплив необоротностей на їх ефективність.</b><br>Вплив необоротностей в процесах теплообміну при кінцевій різниці температур                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | на ефективність зворотних циклів. Способи зниження цих необоротностей.<br>Самостійна робота.<br>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції.                                                                                                                                                        |
| 19. | <b>Повітряна холодильна установка (ПХУ).</b><br>Схема циклової частини повітряної холодильної установки (ПХУ). Ідеальний і реальний цикли ПХУ. Вплив внутрішніх і зовнішніх необоротностей на ефективність реального циклу ПХУ.<br>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції.                     |
| 20. | <b>Парокомпресорна холодильна установка</b><br>Особливості реалізації зворотного циклу з реальним робочим тілом, цикл парокомпресорної холодильної установки ПКХУ.<br>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції.                                                                                  |
| 21. | Підвищення ефективності та надійності роботи ПКХУ<br>Вплив необоротностей на ефективність циклу ПКХУ і способи їх подолання.<br>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції.                                                                                                                        |
| 22. | <b>Теплонасосні установки.</b><br>Особливості циклів ТНУ. Застосування ТНУ в системах тепlopостачання, теплохолодопостачання та кондиціонування повітря. Економія палива при використанні ТНУ в порівнянні з електронагрівачем, районною котельнею.<br>Самостійна робота. Підготовка до наступної лекції. |
| 23. | <b>Оглядова лекція.</b><br>Основні висновки, які витікають із вивчення курсу технічної термодинаміки і перспективи використання отриманих знань в наступних теплотехнічних дисциплінах та в інженерній практиці.                                                                                          |

### Практичні заняття

Основним завданням практичних занять є – поглиблення розуміння студентами лекційного матеріалу, навчити студентів виконувати самостійно розрахунки.

При проведенні практичних занять від студента вимагається вивчення відповідного розділу лекційного матеріалу, як за допомогою конспекту лекцій, так і за допомогою підручника, а також рекомендованих посібників. При цьому особливу увагу необхідно приділяти фізичній суті тих чи інших процесів і засвоєнню на її основі методів розрахунку конкретних термодинамічних процесів.

Слід зауважити, що набуття умінь і навичок виконання розрахунків може бути досягнуто студентом тільки у процесі регулярного самостійного виконання конкретних задач і завдань.

| № з/п | Назва теми заняття та перелік основних питань (перелік дидактичного забезпечення, посилання на літературу та завдання на СРС)                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 1.    | <b>Ідеальні газові суміші.</b><br>Переведення складу газової суміші від задання в одних частках в інші.<br>Обчислення уявного молях, газової сталої суміші, парціальних тисків компонентів, густини суміші і компонентів в суміші. Термічне рівняння суміші і окремих компонентів. Обчислення калоричних параметрів $u$ , $h$ , $s$ у випадку $c = const$ , $c = c(T)$ . |
| 2.    | <b>Вологе повітря.</b><br>Обчислення характеристик вологого повітря: абсолютна, максимальна абсолютна та відносна вологість; температура точки роси, вологовміст. Ентальпія вологого                                                                                                                                                                                     |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | повітря. Діаграма $h - d$ для вологого повітря                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 3.  | <b>Насос – адіабатна машина.</b><br>Визначення параметрів робочого тіла та енергетичних характеристик процесу, побудова процесу в діаграмах $p-v, Ts$ . висновки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 4.  | <b>Ідеальний і реальний цикли Ренкіна.</b><br>Розрахунки окремих елементів циклу (ПГ, турбіна, конденсатор, <b>насос</b> ), зображення процесів в $t-s, h-s, p - v$ - діаграмах. Енергетичні результати циклу і його ефективність.                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 5.  | <b>Удосконалення циклів ПСУ.</b><br>Вплив параметрів робочого тіла на ефективність циклу Ренкіна.<br>Визначення впливу початкових ( $p_1, t_1$ ) і кінцевих ( $p_2, x_2$ ) параметрів на ефективність ідеального і реального циклу Ренкіна.                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 6.  | <b>Енергетичні баланси простої паросилової установки (ПСУ).</b><br>Реальний цикл Ренкіна. Енергетичні баланси окремих вузлів ПСУ (парогенератор, турбогенератор) і ПСУ в цілому. Оцінка ефективності ПСУ.<br>Цикл з проміжним перегрівом пари. Ідеальний регенеративний цикл.<br>Оцінка ефективності циклу з проміжним перегрівом пари. Вплив тиску проміжного перегріву пари на ефективність циклу. Оцінка максимального ефекту від регенерації при заданих $P_1, t, P_2$ і температурі живильної води.              |
| 7.  | <b>Регенеративний цикл з виносними РП.</b><br>Рішення задач на регенеративні цикли з одним і двома регенеративними підігрівачами (РП) живильної води (РП змішуючого типу). Оцінка впливу кількості РП на ефективність циклу. Вибір оптимальної температури живильної води для заданої кількості РП.                                                                                                                                                                                                                   |
| 8.  | <b>Цикли і установка ТЕЦ.</b><br>Енергетичні баланси окремих вузлів циклу ТЕЦ і установки в цілому.<br>Визначення економії палива на ТЕЦ в порівнянні з роздільним виробництвом електроенергії (на КЕС) і теплоти для теплопостачання споживачів (в районній котельні)                                                                                                                                                                                                                                                |
| 9.  | <b>Одноступінчаті компресори.</b><br>Визначення параметрів і роботи нагнітання одноступінчатого компресора в ізотермічному, адіабатному і політропному процесах.<br><b>Двоступінчастий компресор.</b><br>Визначення оптимального розподілу тиску по ступеням. Зображення процесу двоступінчастого нагнітання в $p-v, t-s$ - діаграмах. Оцінка зменшення роботи нагнітання в порівнянні з одноступінчастим компресором при підвищенні тиску до того ж $P_2$                                                            |
| 10. | <b>Цикли ГТУ</b><br>Ідеальні (простий і регенеративний) цикли ГТУ.<br>Визначення ефективності циклів і впливу регенерації на підвищення ефективності. Оцінка відношення роботи компресора до роботи турбіни в ідеальному циклі.<br>Ідеальний цикл ГТУ з багаступінчастим стисненням та розширенням робочого тіла.<br>Визначення ефективності циклу з двома ступенями при стисненні та розширенні. Аналіз ефективності цього циклу в порівнянні з ідеальними циклами (простим і регенеративним).<br>Реальні цикли ГТУ. |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Оцінка впливу необоротності адіабатних процесів стиснення і розширення робочого тіла на ефективність реального циклу. Комбіновані задачі на цикли ГТУ                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 11. | <b>Сопла та дифузори</b><br>Просте сопло і сопло Лаваля.<br>Визначення параметрів, швидкості і витрати робочого тіла, геометричних характеристик простого сопла і сопла Лаваля (без врахування тертя і з врахуванням тертя в робочому тілі).                                                                                                                                                                                                           |
| 12. | <b>Дроселювання ідеальних та реальних газів</b><br>Дроселювання водяної пари, визначення параметрів, інтегрального дросель-ефекту. Зображення процесу в $h-s$ , $t-s$ - діаграмах. Застосування дроселювання для зміни потужності парових турбін.<br>Дроселювання ідеального газу, визначення параметрів, інтегрального дросель-ефекту, зображення процесу в $p-v$ , $t-s$ - діаграмах. Застосування дроселювання для зміни потужності парових турбін. |
| 13. | <b>Цикли холодильних установок, де РТ – ідеальний газ.</b><br>Ідеальний і реальний цикл ПХУ.<br>Розрахунки енергетичних результатів і ефективності повітряних циклів ПХУ.<br>Оцінка впливу необоротності в адіабатних машинах (компресор, детандер) на ефективність циклу ПХУ. Цикл ТНУ, робоче тіло - водень.                                                                                                                                         |
| 14. | <b>Цикли парокompресорних холодильних установок (ХУ) і ТНУ.</b><br>Визначення енергетичних результатів циклів.<br>Оцінка впливу різних необоротностей на ефективність циклів.                                                                                                                                                                                                                                                                          |

## 6. Самостійна робота студентів

| № з/п | Назва теми, що виноситься на самостійне опрацювання                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Ексергія і анергія різних енергоресурсів системи. Ексергетичний баланс поточних процесів та його складові. Показники ефективності процесів, ексергетичний к.п.д. Вплив необоротностей на втрати ексергії при спалюванні палив, в процесах теплообміну при кінцевій різниці температур між тілами та внаслідок тертя в робочому тілі.<br>Література: (Л1), с.258-263, (Л1д) с.152-190. |
| 2.    | Реальний тепломеханічний цикл. Література: Електронний конспект лекцій                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 3.    | Залежності $\eta_i = f(\eta_t, \eta_{oi}^{TMC})$ та $\eta_{oi}^{TMC} = f(\eta_{oi}^T, \eta_{oi}^H, \varphi_t)$ вивід та аналіз впливу необоротностей.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                                                                                                                                                      |
| 4.    | Органічний цикл Ренкіна.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 5.    | Цикл з проміжним (повторним) перегрівом пари.<br>Цикл з проміжним перегрівом пари як засіб підвищення початкового тиску пари.<br>Вибір тиску для процесу повторного перегріву.<br>Література: електронний конспект лекцій, (Л1), с.314-315; (Л6), с.356-359; (Л1д), с.464-467                                                                                                         |
| 6.    | Особливості проміжного перегріву пари в циклах АЕС.<br>Література: (Л1), с.314-315; (Л6), с.356-359; (Л1д), с.464-467                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 7.    | Цикл ПСУ з двома регенеративними підігрівачами змішуючого типу.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

|     |                                                                                                                            |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Література: електронний конспект лекцій, (Л1), с.316-319; (Л6), с.359-369; (Л1д), с.468-472                                |
| 8.  | Когенерація, тригенерація<br>Література: електронний конспект лекцій, (Л1), с. 323-324; (Л6), с.375-385.                   |
| 9.  | Підготовка до наступної лекції - одноступінчате та багатоступінчате нагнітання.<br>Література: електронний конспект лекцій |
| 10. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                 |
| 11. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій.                                                |
| 12. | Цикл МГД - генератора.<br>Література: (Л6), с.370-374                                                                      |
| 13. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                 |
| 14. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій.                                                |
| 15. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій.                                                |
| 16. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій.                                                |
| 17. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                 |
| 18. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                 |
| 19. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                 |
| 20. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                 |
| 21. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                 |
| 22. | Підготовка до наступної лекції.<br>Література: електронний конспект лекцій                                                 |

## 7. Індивідуальні Завдання

Набуття умінь і навичок застосування основних теоретичних положень курсу до розв'язання практичних інженерних задач може бути досягнуто у процесі виконання різного роду індивідуальних завдань. З метою поглиблення вивчення дисципліни та набуття стійких вмінь та навичок самостійних кваліфікованих розрахунків передбачено виконання студентами денної форми навчання на основі другого кредитного модуля дисципліни в четвертому семестрі розрахунково-графічної роботи. Студенти денної форми навчання виконують також домашні завдання за тематикою практичних занять.

Розрахунково-графічна робота: «Розрахунок та аналіз показників ефективності паросилових циклів і установок». Ціль - формування і закріплення умінь термодинамічно об'єктивної оцінки

ефективності циклів і установок з усвідомленням причин обмеженої ефективності і розумінням шляхів її підвищення.

Зміст РГР та методика їх виконання, а також зміст і методика виконання домашніх контрольних робіт та вимоги до оформлення індивідуальних завдань визначаються відповідними методичними вказівками

Метою проведення поточних контрольних заходів є систематична перевірка засвоєння студентами пройденого матеріалу та набутих умінь після вивчення відповідних розділів робочої навчальної програми, що дозволяє вносити зміни в організацію і зміст самостійної роботи кожного студента та планувати проведення консультацій на протязі семестру.

Для зворотного зв'язку та контролю засвоєння матеріалу, що вивчається, передбачено проведення 2-х поточних контрольних, що поділені, які включають теоретичні питання та задачі.

*МКР №1.* Проводиться за наступними темами .(Розділ 7): Газові та парогазові суміші. Характеристики вологого повітря: абсолютна, максимальна абсолютна та відносна вологість; температура точки роси, вологовміст. Ентальпія вологого газу. Діаграма h-d для вологого повітря

*МКР №2.* Проводиться за наступною темою. (Розділ 10): Паросилові цикли та установки

*МКР №3.* Проводиться за наступними темами. (Розділ 11): Термодинамічні основи теорії нагнітання. Газосилові цикли і установки.

*МКР №4.* Проводиться за наступною темою. (Розділ 13): Цикли повітряної та парокомпресорної холодильних установок

## Політика та контроль

### 8. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

*Зазначається система вимог, які викладач ставить перед студентами:*

- *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;*
- *захист розрахункової роботи відбувається на практичному занятті у виділений для цього викладачем час;*
- *захист лабораторних робіт відбувається на занятті у виділений для цього викладачем час.*

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

*Види контролю знань студентів з дисципліни:*

- *відповіді на лекційних заняттях;*
- *відповіді на практичних заняттях;*
- *захист розрахунково-графічної роботи;*
- *захист лабораторних робіт;*
- *виконання завдань СРС;*
- *виконання МКР (дві частини);*
- *відповідь на заліку.*

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

- 1) *відповіді на лекційних заняттях;*
- 2) *виконання студентом домашніх завдань;*
- 3) *виконання РГР*
- 4) *виконання завдань СРС;*
- 5) *виконання МКР;*

6) відповідь на екзамені.

### Система рейтингових балів та критерії оцінювання

#### **1. Робота на лекційних заняттях**

Ваговий бал — 1. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях: = **5 балів**.

Критерії оцінювання:

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

#### **2. Робота на практичних заняттях**

Ваговий бал – 5.

Критерії оцінювання:

**5 балів** — повна вірна відповідь на поставлене запитання; **4 бали** — відповідь має несуттєві похибки; **3 бали** — неповна відповідь... **0 балів** — наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді.

#### **3. Виконання завдань РГР**

Ваговий бал – 20. Виконане завдання надається викладачу у вигляді оформленої розрахунково-графічної роботи, виконання завдання РГР обов'язкове.

Критерії оцінювання:

20 балів – в повному об'ємі, правильно і вчасно виконана РГР.

**Штрафні бали:**

– несвоєчасне представлення виконаного завдання РГР без поважної причини (хвороба) – -2 бал.

#### **4. Модульна контрольна робота (МКР)**

Проводиться чотири частини МКР. Ваговий бал кожної частини – 10. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює  $r_4 = 10 \times 4 = 40$  балів.

Критерії оцінювання:

10 балів – повна вірна відповідь на завдання; 7...9 бали – відповідь має несуттєві похибки; 2...6 бали – неповна відповідь; 0...2 бали – наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді, МКР не зараховано.

#### **5. Відповіді на екзамені**

Залік проводиться у письмово-усній формі. Заліковий білет складається з чотирьох практичних питань. Перелік приблизних питань надається студентам перед заліком. Кожне завдання оцінюється у 10 балів, тобто максимальна кількість балів за виконане завдання  $10+10+10+10 = 40$  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 балів;

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

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

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

**Штрафні бали:**

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

### **Заохочувальні бали**

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

### **Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни ( $R_d$ ):**

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

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

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

Максимально можливий стартовий рейтинг:  $R_c = 60$  балів.

Необхідною умовою допуску до заліку є позитивна оцінка з виконання всіх завдань СРС, захист розрахункової роботи та стартовий рейтинг не менше 40 балів.

Студенти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж 40 балів, зобов'язані до початку 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. 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 к.т.н., доц. Соломаха Андрій Сергійович

Ухвалено кафедрою теоретичної і промислової теплотехніки (протокол № 14 від 24.06.2020 р.)

**Погоджено** Методичною комісією теплоенергетичного факультету (протокол № 10 від 25.06.2020р.)