

**Програма підготовки бакалаврів у галузі знань  
14 – "Електрична інженерія"  
зі спеціальності 142 – "Енергетичне машинобудування"  
спеціалізація (освітня програма) "Холодильні машини і установки"**

**"Технічна термодинаміка"**

**330 год. / 11 кредитів ЕКТС  
(60 год. лекцій, 30 год. лабораторних занять, 30 год. практичних занять)**

*Навчальний контент*

**Модуль 1.**

**Змістовний модуль 1. Термодинамічні властивості робочого тіла**

**Тема 1.** Вступ. Мета і задачі курсу. Основні визначення. Предмет і метод технічної термодинаміки. Рекомендована література. Технічна термодинаміка як основа суднової енергетики. Термодинамічна система. Рівноважний, стаціонарний та не рівноважний стан. Термодинамічний процес. Час релаксації в реальному процесі. Параметри стану однорідного робочого тіла. Рівняння стану ідеального газу.

**Тема 2.** Термодинамічні властивості робочих тіл. Термічні і калоричні параметри стану. Дослідження теплоємності газів. МКТ теплоємності речовин. Теплоємності  $c_p$  і  $c_v$ . Коефіцієнт Пуассона. Рівняння Майєра.

**Тема 3.** Суміші газів в ідеально-газовому стані. Способи завдання складу суміші. Співвідношення між масовими, об'ємними, мольними частками. Газова стала та умовна молярна маса суміші. Парціальний тиск, парціальний об'єм компонентів суміші. Парціальна та приведена густина компонентів та їх зв'язок з густиною суміші. Теплоємність газових сумішей.

**Тема 4.** І закон термодинаміки. Диференціальні рівняння та приклади їх використання. Тепло і робота як види передачі енергії. Закон збереження і перетворення енергії. Внутрішня енергія та зовнішня робота. Графічне відображення теплоти і роботи. Діаграми  $v$ - $p$  та  $s$ - $T$ , їх властивості. Ентальпія. Рівняння та формулювання 1-ого закону, приклади їх застосування.

**Тема 5.** Політропний процес (загальний випадок). Рівняння процесу. Розрахунок зміни внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії. Поняття політропного процесу. Методика дослідження. Виведення рівняння політропи. Співвідношення між параметрами  $p$ ,  $V$ ,  $T$ . Розрахунок зміни внутрішньої енергії ентальпії і ентропії.

**Тема 6.** Робота процесу, теплота процесу. Визначення показника політропи. Виведення формул роботи деформаційної та можливої. Розрахунок теплоти процесу (дослідження теплоємності політропного процесу). Способи визначення показника політропи.

**Тема 7.** Сумісні діаграми. Групи політроп. Дослідження ізопроцесів. Сумісні діаграми  $p-v$  і  $T-S$  політропних процесів. Групи політроп. Графічне дослідження (розрахунок) політропних процесів.

**Тема 8.** Загальні умови роботи теплових двигунів. Повні і неповні диференціали в термодинаміці. Джерела теплоти та умови роботи теплових двигунів і холодильних машин. Оборотні та необоротні кругові процеси (цикли) та їх ефективність.

## **Змістовний модуль 2. Термодинамічні цикли газових двигунів**

**Тема 9.** Цикл Карно та його значення. Узагальнений цикл. Регенерація теплоти. Прямий (силовий) та зворотній (холодильний) цикли Карно. Їх ефективність. Узагальнений цикл Карно. Поняття про регенерацію теплоти.

**Тема 10.** Формулювання та диференціальні рівняння II-го Закону. Вивід диференціальних рівнянь для оборотних та необоротних циклів.

**Тема 11.** Поняття ексергії теплоти і роботи. Рівняння Гюї-Стодоли. Корисна робота, максимальна корисна робота (ексергія). Ексергія теплоти і роботи. Рівняння Гюї-Стодоли.

**Тема 12.** Методи порівняння термодинамічної ефективності циклів Методи порівняння ККД оборотних і необоротних циклів. Середня інтегральна температура та еквівалентний цикл Карно. Приклади порівняння циклів за середньоінтегральними температурами підводу та відводу теплоти. Метод коефіцієнтів корисної дії в аналізі необоротних циклів. Ексергетичний метод аналізу теплосилових установок.

**Тема 13.** Основні поняття розділу. Цикл з підводом теплоти при  $v=\text{const}$  Двотактні і чотиритактні двигуни. Індикаторна діаграма і теоретичний цикл. Метод дослідження. Послідовність розрахунку. Середній цикловий (індикаторний) тиск. Цикл ДВЗ із згорянням пального при сталому об'ємі.

**Тема 14.** Цикл з підводом теплоти при  $p=\text{const}$  і з мішаним підводом теплоти. Цикл ДВЗ із згорянням пального при  $p=\text{const}$ . Цикл ДВЗ з мішаним згорянням палива. Приклади порівняння циклів. Деякі економічні показники роботи.

**Тема 15.** Дослідження роботи одноступеневого компресора Дійсна індикаторна діаграма і теоретичний цикл роботи одноступеневого компресора при ізотермічному, адіабатичному і політропному процесі стиснення. "Шкідливий" простір та його вплив на роботу компресора.

**Тема 16.** Дослідження роботи багатоступеневого компресора. Економічні показники роботи. Багатоступеневе стиснення,  $v$ - $p$  і  $S$ - $T$  діаграми. Теплота охолодження компресора. Показники роботи реального компресора.

**Тема 17.** Загальні визначення з теорії течії газів та пари. Течія газів і пари. Перший закон термодинаміки для газового потоку. Основні припущення. Швидкість звуку. Число Маха. Сопло і дифузор. Основні співвідношення.

**Тема 18.** Закон обертання впливу. Закон обертання впливу: випадки теплового, механічного, витратного і геометричного сопел. Особливості руху газів у вертикальних каналах. Течія газів з тертям.

**Тема 19.** Розрахунок геометричних сопел. Розрахунок геометричних сопел. Швидкість потоку та масова витрата. Вплив на витікання внутрішніх опорів. Параметри потоку при повному адіабатичному його гальмуванні.

**Тема 20.** Основні цикли ГТУ. Регенерація теплоти. Принципова схема, цикл і дослідження циклів з підвищенням теплоти при  $p=\text{const}$ , при  $v=\text{const}$ . Регенерація теплоти та її ефективність. Порівняння циклів.

**Тема 21.** Складні цикли ГТУ, які працюють по замкненому циклі. Особливості роботи АГТУ. Цикли з багатоступеневим стисненням повітря і розширенням робочого тіла. Межовий випадок.

### **Змістовний модуль 3. Термодинамічні цикли реального робочого тіла**

**Тема 22.** Термодинамічні властивості реальних газів. Діаграми стану. Термодинамічні властивості реальних газів. Коефіцієнт стисливості. Діаграми поведінки реальних газів. Критичні параметри речовини. Рівняння стану реальних газів. Принцип відповідних станів (подібність термодинамічних властивостей речовин).

**Тема 23.** Дослідження термодинамічних процесів з водяною парою. Водяна пара. Основні визначення. Діаграми стану. Таблиці теплофізичних властивостей води і водяної пари. Розрахунок процесів виробництва перегрітої пари. Дослідження ізобарного процесу. Дослідження термодинамічних ізопроцесів з водяною парою в діаграмах  $v$ - $p$ ,  $S$ - $T$  та  $i$ - $S$ . Дослідження вологих сумішей (на прикладі вологого повітря). Визначення. Можливі стани. Абсолютна і відносна вологість. Точка роси. Вологовміст. Основні співвідношення для вологого повітря. Процеси обробки вологого повітря.

**Тема 24.** Цикл Карно та його значення. Цикл Карно. Можливості реалізації. Переваги і недоліки. Цикл Ренкіна та способи підвищення його ефективності. Цикл Ренкіна з насиченою парою. Цикл Ренкіна з перегрітою парою. Вплив параметрів пари на вході в турбіну і в конденсаторі. Цикл ПСУ з проміжним перегрівом пари. Реальні втрати в процесі розширення пари. Регенеративні цикли

**Тема 25.** Теплофікація. Бінарні цикли. Термодинамічні основи теплофікації. Бінарні цикли: вимоги до робочих тіл; схема і цикл ртутно-водяної бінарної установки. Атомні ПСУ. Особливості роботи атомних паросилових установок.

**Тема 26.** Парогазові установки. Парогазові установки зі змішанням робочих тіл. Парогазові установки з роздільними потоками газу і пари. Цикли з МГД-генератором. Принцип дії МГД-генератора. Комбіновані ПСУ с МГД-генератором. Схема, цикл і к.к.д. установки розімкнутого і замкнутого циклу. Перспективні методи перетворення теплоти в електричну енергію

**Тема 27.** Способи зниження температури робочого тіла. Дроселювання реального і ідеального газів. Фізичні основи. Диференціальний та інтегральний дросель-ефект. Температура та криві інверсії. Дроселювання водяної пари. Адіабатне розширення з виробництвом роботи.

**Тема 28.** Зворотній цикл Карно. Повітряна холодильна установка. Зворотний оборотний цикл Карно та його ефективність. Схема і цикл повітряної холодильної машини. Парокомпресорна холодильна установка. Схема і цикл парокомпресорної холодильної машини.

**Тема 29.** Пароежекторна холодильна установка. Абсорбційна холодильна установка. Схема і цикл пароежекторної холодильної машини. Абсорбційна холодильна машина. Тепловий насос. Каскадні схеми роботи холодильних установок. Тепловий насос та ефективність його роботи.

**Тема 30.** Охорона навколишнього середовища від роботи теплових установок. Види забруднень довкілля при роботі теплосилових установок. Засоби зниження шкідливих викидів. Методи боротьби за чистоту навколишнього середовища.

**Програма підготовки бакалаврів у галузі знань  
14 – "Електрична інженерія"  
зі спеціальності 142 – "Енергетичне машинобудування"  
спеціалізація (освітня програма) "Холодильні машини і установки"**

**"Технічна термодинаміка"**

**330 год. / 11 кредитів ЕКТС  
(60 год. лекцій, 30 год. лабораторних занять, 30 год. практичних занять)**

*Теми лабораторних занять*

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
		денна форма навчання
1	Визначення густини і коефіцієнта стисливості повітря методом витікання через отвір	2
2	Визначення питомої теплоємності газу при сталому тиску методом потоку	2
3	Визначення питомих теплоємностей $c_{рт}$ та $c_{ут}$ реальних газів методом адіабатичного розширення	4
4	Дослідження процесів адіабатичного процесу витікання повітря через сопло, що звужується	4
5	Експериментально-теоретичне дослідження фазових переходів рідина-насичена пара	4
6	Дослідження ізохоричного процесу для води і водяної пари	4
7	Дослідження процесів підігріву, охолодження і осушення вологого повітря	2
8	Дослідження циклу паросилової установки	4
9	Дослідження циклу парокомпресорної холодильної машини	4
<b>Разом:</b>		<b>30</b>

**Програма підготовки бакалаврів у галузі знань  
14 – "Електрична інженерія"  
зі спеціальності 142 – "Енергетичне машинобудування"  
спеціалізація (освітня програма) "Холодильні машини і установки"**

**"Технічна термодинаміка"**

**330 год. / 11 кредитів ЕКТС  
(60 год. лекцій, 30 год. лабораторних занять, 30 год. практичних занять)**

***Теми практичних занять***

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
		денна форма навчання
1	Параметри стану. Рівняння стану. Суміші ідеальних газів. Розв'язання типових задач.	2
2	Теплоємність однорідного робочого тіла. Таблиці теплоємностей. Розв'язання типових задач.	2
3	Теплоємність суміші. Розв'язання типових задач.	2
4	Перший закон термодинаміки. Розв'язання типових задач.	2
5	Практичні приклади побудови циклу газового двигуна з відомими значеннями показників політроп.	2
6	Розрахунок циклу з чотирьох процесів на конкретному прикладі. Перевірка результатів.	2
7	Реальний та ідеальний цикли. Вплив необоротності реальних процесів. Розв'язання типових задач.	2
8	Способи підвищення ККД циклу. Умови реалізації та ефективність застосування регенерації теплоти.	2
9	Розрахунок засобів підвищення ККД циклів ДВЗ	2
10	Реальні та ідеальні гази. Водяна пара. Діаграми стану водяної пари. Приклади використання діаграм стану.	2
11	Розрахунок процесів з водяною парою за допомогою діаграм стану.	2
12	Розрахунок основного циклу паросилових установок.	2
13	Вивчення засобів підвищення ККД циклу паросилової установки.	2
14	Розрахунок втрат працездатності реальних циклів паросилових установок. Розрахунок ефективності застосування регенерації теплоти у паросилових установках.	2
15	Розрахунок циклу парокомпресійної холодильної машини	2
<b>Разом:</b>		<b>30</b>

**Програма підготовки бакалаврів у галузі знань  
14 – "Електрична інженерія"  
зі спеціальності 142 – "Енергетичне машинобудування"  
спеціалізація (освітня програма) "Холодильні машини і установки"**

**"Технічна термодинаміка"**

**330 год. / 11 кредитів ЕКТС  
(60 год. лекцій, 30 год. лабораторних занять, 30 год. практичних занять)**

*Завдання для самостійної роботи*

№ з/п	Назва теми	Кількість годин
		Денна форма з норм.т.н.
1	Розрахунок параметрів ідеально-газової суміші	20
2	Теплоємності компонентів і суміші	20
3	Зміна калоричних параметрів компонентів і суміші	22
4	Якісна побудова та аналіз процесів, що складають цикл	22
5	Розрахунок довільного циклу	22
6	Оптимізація циклу газового двигуна	20
7	Детальний розрахунок оптимального циклу	22
8	Графічна масштабна побудова оптимального циклу у $v-p$ та $s-T$ координатах	22
9	Втрати працездатності в оптимальному циклі	20
10	Регенерація теплоти в циклах теплових двигунів. Порівнювальний аналіз циклів.	20
<b>Разом:</b>		<b>210</b>

**Програма підготовки бакалаврів у галузі знань  
14 – "Електрична інженерія"  
зі спеціальності 142 – "Енергетичне машинобудування"  
спеціалізація (освітня програма) "Холодильні машини і установки"**

**"Технічна термодинаміка"**

**330 год. / 11 кредитів ЕКТС  
(60 год. лекцій, 30 год. лабораторних занять, 30 год. практичних занять)**

*Завдання для поточного та підсумкового контролю*

**Контрольні питання до 1-го модуля**

1. Які існують основні параметри стану робочого тіла та рівняння стану ідеальних газів?
2. Що таке термодинамічний процес: рівноважний, нерівноважний?
3. Які термодинамічні процеси називають зворотніми та незворотніми? Наведіть приклади.
4. Що таке робота процесу, теплота процесу? Їх графічне відображення на діаграмах.
5. З чого складається якісна різниця понять роботи і теплоти.
6. Яка з робіт більша: у зворотньому чи в незворотньому процесі і чому.
7. Формулювання та диференційні рівняння першого закону термодинаміки
8. Які існують принципи класифікації теплоємностей ідеальних газів?
9. Які з теплоємностей більші: ізохорні чи ізобарні і чому.
10. Записати аналітичні вирази питомої, об'ємної і молярної теплоємностей суміші ідеальних газів.
11. Як визначити кількість теплоти в термодинамічному процесі, якщо є табличні значення середніх теплоємностей?
12. Що таке політропний процес? Дати узагальнюючу  $p$ - $V$   $T$ - $S$  діаграми полі-тропних процесів.
13. В яких межах змінюється показник політропи.
14. Що входить до завдання аналізу термодинамічного процесу.
15. Які аналітичні вирази для визначення зміни калоричних параметрів є загальними для всіх термодинамічних процесів з ідеальним газом?
16. Що таке ізопроцеси? Дати їх загальну характеристику.
17. В яких політропних процесах і чому питома теплоємність ідеального газу буде негативною?
18. Чому дорівнює зміна внутрішньої енергії в круговому процесі.
19. Чому в адіабатному процесі розширення ідеального газу температура зменшується, а при стисненні підвищується?
20. Як змінюється температура в ізохорному процесі?



## Контрольні питання до 2-го модуля

21. Які існують формулювання та диференціальні рівняння другого закону термодинаміки?
22. Які умови необхідні для здійснення безперервного перетворення теплоти в роботи.
23. У чому сутність принципу зростання ентропії ізольованої термодинамічної системи?
24. Яке значення має в термодинаміці цикл Карно?
25. Що називається термічним ККД теплового двигуна?
26. Чому термічний ККД не може дорівнювати 100%?
27. Що таке холодильний коефіцієнт і як він визначається.
28. Що називають ексергією джерела теплоти?
29. За яким виразом визначають втрату максимально можливої роботи через незворотність термодинамічних процесів?
30. Які існують методи зрівняння ефективності циклів теплових двигунів?
31. Яка існує методика розрахунку одноступінчастого та багатоступінчастого компресора?
32. Методика розрахунку циклів теплових двигунів.
33. Дати приклад розрахунку циклу ДВЗ з підведенням теплоти при  $v = \text{const}$ .
34. Дати приклад розрахунку циклу ДВЗ з підведенням теплоти при  $p = \text{const}$ .
35. Дати приклад розрахунку циклу ДВЗ зі змішаним підведенням теплоти.
36. Перший закон термодинаміки для газового потоку.
37. Закон обертання впливу. Види сопел.
38. Дати приклад розрахунку циклу ГТУ.
39. В чому суть ускладнення циклів реальних ГТУ?
40. В чому є особливості роботи реактивних і ракетних двигунів?

## Контрольні питання до 3-го модуля

41. Які існують відмінності у властивостей ідеальних та реальних газів? Дати приклади рівнянь стану реальних газів.
42.  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$ ,  $h$ - $s$  діаграми стану водяної пари.
43. Які існують особливості розрахунків процесів з водяною парою?
44. Вологе повітря, основні параметри стану. Як визначити відносну вологість за допомогою аспіраційного психрометра?
45. Цикл Карно на вологій парі. Особливості реалізації.
46. Які існують цикли паросилових установок? Дати їх характеристику.
47. Як впливають необоротності на ефективність циклу Ренкіна?
48. Як виконується регенерація теплоти в паросилових установках?
49. В чому є особливість теплофікаційних циклів?
50. Бінарні цикли. В чому їх термодинамічні переваги.
51. Особливості роботи АЕУ.

52. В чому особливості реалізації термодинамічних циклів комбінованих установок?
53. Складні термодинамічні цикли з МГД-генератором.
54. Що таке дроселювання реальних газів? Вивід рівняння диференціального дросель-ефекту.
55. Ідеальна холодильна установка за циклом Карно.
56. Повітряна холодильна установка.
57. Парокомпресійна холодильна установка.
58. Абсорбційна холодильна установка.
59. Тепловий насос. Що це таке?
60. Охорона навколишнього середовища від роботи теплосилових установок.