



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування

В.І.ПЕНЬКОВ

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Європейська кредитно-трансферна система

*Для студентів напряму 6.090601
«Теплоенергетика»*

Рівне – 2010



Національний університет
водного господарства
та природокористування

УДК 621.1
ББК 91.3
П25

*Затверджено вченого радою Національного університету водного
господарства та природокористування.
(Протокол № 7 від 25 червня 2010 р.)*

Рецензенти:

Лозбін В.І., доктор техн. наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування;
Рябенко О.А., доктор техн. наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування.

Пеньков В.І.

П25 Технічна термодинаміка: Навч. посібник. – Рівне: НУВГП,
2010. – 209 с.



Навчальний посібник курсу «Технічна термодинаміка» містить матеріал відповідно типової програми для студентів напряму 6.090601 «Теплоенергетика» і включає також методичні розробки до практичних і лабораторних занять, завдання та методику виконання розрахунково-графічної і курсової робіт, збірник прикладів, термодинамічні діаграми, питання з перевірки знань студентів в умовах Європейської кредитно-трансферної системи.

УДК 621.1
ББК 31.3

© Пеньков В.І., 2010
© НУВГП, 2010



ЗМІСТ

Передмова	5
1. Типова програма нормативної навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка»	6
1.1. Опис навчальної дисципліни	6
1.2. Програма навчальної дисципліни	7
Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ	7
Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального РТ....	8
Змістовий модуль 3. Термодинаміка циклів ТД	9
1.3. Структура навчальної дисципліни	12
2. Методичні рекомендації до вивчення дисципліни	14
Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ	14
Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального РТ ...	32
Змістовий модуль 3. Термодинаміка циклів ТД	55
3. Методичні рекомендації до лабораторних занять	112
Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ	112
Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального РТ ...	112
Змістовий модуль 3. Термодинаміка циклів ТД	112
4. Методичні рекомендації до практичних занять	119
5. Контрольні питання	120
Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ	120
Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального РТ....	122
Змістовий модуль 3. Термодинаміка циклів ТД	125
6. Контрольні вправи	129
Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ	129
Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального РТ ...	141
Змістовий модуль 3. Термодинаміка циклів ТД	149



7. Контрольні тести	167
Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ	167
Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального РТ ...	172
Змістовий модуль 3. Термодинаміка циклів ТД	176
8. Індивідуальна робота	182
8.1. РГР – тема, завдання	182
8.2. КР – тема, завдання	189
9. Контрольні тестування	205
9.1. Форми контролю	205
9.2. Розподіл балів	206
10. Методичне забезпечення	208

Перелік скорочень:

РТ – робоче тіло;

ТД – тепловий двигун;

РГР – розрахунково-графічна робота;

КР – курсова робота;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПК – поршневий компресор;

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

ГТУ – газотурбінна установка;

ПСУ – паросилова установка;

КЕС – конденсаційна електростанція;

ТЕЦ – теплоелектроцентраль;

РП – регенеративний підігрівник;

МГДГ – магніто-гідродинамічний генератор;

ХМ – холодильна машина



ПЕРЕДМОВА

Технічна термодинаміка є базовою дисципліною при підготовці спеціалістів теплоенергетиків.

Предмет технічної термодинаміки вивчає теплофізичні характеристики ідеальних і реальних робочих тіл (РТ), газові процеси та процеси водяної пари, які використовуються і здійснюються у теплових двигунах (ТД).

Набуття знань, вміння і навичок їх практичного застосування є основною **метою** курсу технічної термодинаміки.

Студент повинен:

Знати закони термодинаміки, теплофізичні характеристики РТ, закономірності і процеси перетворення первинних енергоресурсів у корисні види енергій у теоретичних і практичних циклах ТД, техніко-економічні показники та ефективність цих перетворень, сучасні методи добування корисних видів енергії, комбіновані цикли.

Вміти розраховувати теплофізичні характеристики РТ, газові процеси і процеси водяної пари, розраховувати теоретичні і практичні цикли ТД, їх енергобаланси, ефективність, вміти аналізувати та знаходити методи підвищення їх працездатності. Вміти знаходити нові способи добування корисних видів енергії.



1. Типова програма нормативної навчальної дисципліни «Технічна термодинаміка»

1.1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників		Напрям підготовки освітньо-кваліфікаційний рівень		Характеристика навчальної дисципліни	
				денна форма навчання	Форма навчання
Кількість кредитів, відповідних ECTS – 7,75				Нормативна	
Модулів				Рік підготовки	
3 семестр	4 семестр			2	2
2	1			Семестри	
Змістових модулів		Напрям підготовки 6.090601 «Теплоенергетика»		1	2
2	1			3	4
РГР	КР			Лекції, год.	
Загальна кількість годин				26	24
135	144			10	–
Тижневих годин для денної форми навчання				Лабораторні, год.	
аудиторних				26	12
4	4			–	8
CPC				Практичні, год.	
6	8			–	12
Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної і індивідуальної роботи становить, %				Самостійна робота, год.	
				71	74
				115	112
				РГР	КР
				12	18
				–	–
				Вид контролю	
				залік	іспит
				–	іспит
				45 ÷ 55	
				12 ÷ 88	



1.2. Програма навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового робочого тіла

Тема 1. Параметри стану робочого тіла

Фізичні і енергетичні параметри стану РТ. Фізичний зміст, одиниці виміру, розрахункові формулі. Залежність від характеру процесу. Рівняння стану газового РТ.

Тема 2. Теплофізичні характеристики газового РТ

Визначення теплофізичних характеристик газу, питомого об'єму, густини, газової сталої, теплоємності. Фізичний зміст, одиниці виміру. Види теплоємності, залежність від характеру процесу, від температури. Розрахунок теплоємності при різних температурах. Рівняння Майера. Таблиці теплоємностей.

Тема 3. Газові суміші

Закон Дальтона, способи завдання. Формула переходу. Парціальний тиск, зведений об'єм. Розрахунок газової суміші: питомого об'єму, густини, молекулярної маси, газової сталої, теплоємності.

Тема 4. Перший закон термодинаміки

Поняття тепла, роботи, енергії, розрахункові формулі, розмірність. Математичний вираз першого закону термодинаміки, його аналіз. Вираз першого закону через внутрішню енергію, через енталопію і для рухомого робочого тіла. Робоча і теплова діаграми.

Тема 5. Газові процеси

Види процесів. Рівняння процесів. Показник політропи і адіабати. Розрахункові формулі для процесів: співвідношення параметрів, перший закон термодинаміки, тепло, робота зміни об'єму і зміни тиску, зміна внутрішньої енергії; ентальпії, ентропії, теплоємність. Одиниці виміру.

Тема 6. Аналіз газових процесів

Зображення процесів в термодинамічних діаграмах. Аналіз процесів стиску, розширення, підводу і відводу тепла. Зображення роботи зміни об'єму, тиску, тепла в тепловій діаграмі. Розрахунок газових процесів.



Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального РТ

Тема 7. Диференціальні рівняння термодинаміки

Рівняння стану реального РТ. Характеристичні функції термодинаміки. Зображення їх в діаграмах. Диференціальні співвідношення термодинаміки. Диференціальні рівняння внутрішньої енергії, енталпії, ентропії, теплоти, теплоємності для реального РТ. Хімічний потенціал. Фазові переходи. Фазова, хімічна рівновага. Третій закон термодинаміки.

Тема 8. Водяна пара

Рівняння стану водяної пари. Робоча, теплова діаграми ізобарного процесу добування водяної пари. Види водяної пари, властивості. Процес пароутворення. Ступінь сухості вологої насыченої пари. Параметри пари, їх визначення.

Тема 9. *h-S* діаграма водяної пари

Побудова діаграми. Зображення процесів. Розрахунок параметрів киплячої води, вологої насыченої пари, сухої насыченої пари, перегрітої пари.

Тема 10. Процеси водяної пари

Зображення процесів в діаграмах водяної пари, їх розрахунок, розрахунок роботи зміни об'єму, тиску, зміни внутрішньої енергії, енталпії, ентропії. Розрахунок теплоти у процесах.

Тема 11. Вологе повітря

Склад вологого повітря, парціальний тиск перегрітої пари у повітрі. Ізохорне, ізобарне, ізотермічне охолодження вологого повітря. Абсолютна, відносна вологість. Вологовміст, температура точки роси. Визначення молекулярної маси, питомого об'єму, густини, теплоємності, енталпії вологого повітря. Одиниці вимірювань.

Тема 12. *h-d* діаграма вологого повітря

Побудова діаграми. Визначення параметрів вологого повітря: абсолютної, відносної вологості, температури точки роси, вологовмісту, парціального тиску пари, енталпії, густини за допомогою *h-d*-діаграми. Розрахунок процесів сушіння.



Тема 13. Витікання робочого тіла

Поняття витікання. Сопло. Дифузор. Принцип дії. Зображення процесу витікання в термодинамічних діаграмах. Розрахунок наявної (технічної) роботи, швидкості витікання, витрати РТ. Критичне співвідношення тисків. Вибір форми сопла. Дроселювання, зміна параметрів при дроселюванні.

Змістовий модуль 3. Цикли теплових двигунів – ТД

Тема 14. Другий закон термодинаміки

Формульовання другого закону термодинаміки. Поняття циклу. Прямі, зворотні цикли. Обертальні і необертальні цикли. Цикл Карно. Термічний ККД. Використання циклу Карно. Регенеративний цикл. Ступінь термодинамічної досконалості циклів. Холодильний коефіцієнт. Математичний вираз другого закону термодинаміки.

Тема 15. Поршневий компресор

Одноступеневий ПК. Процеси ПК. Ступінь стиску. Температура стиску. Робота стиску. Способи зменшення роботи стиску. Охолодження ПК, розрахунок. Енергобаланс ПК.

Тема 16. Двоступеневий поршневий компресор

Робоча, теплова діаграми ПК. Робота стиску. Температура стиску. Максимально допустима температура стиску і ступінь стиску. Визначення кількості ступенів. Розрахунок системи охолодження багатоступеневих ПК. Ефективність системи охолодження, показник політропи стиску. Дійсна індикаторна діаграма ПК.

Тема 17. Теоретичні цикли ДВЗ

Теоретичні цикли ДВЗ з підводом тепла при сталому об'ємі, при сталому тиску, при змішаному підводі. Практичне застосування. Зображення циклів в термодинамічних діаграмах. Тепловий розрахунок циклів ДВЗ: параметрів в характерних точках циклу, корисне тепло і роботу, термічного ККД. Енергобаланс ДВЗ. Порівняння циклів.

Тема 18. Теоретичні цикли ГТУ

Схеми газотурбінних установок з підводом тепла при stałому



тиску і при сталому об'ємі. Зображення циклів в термодинамічних діаграмах. Тепловий розрахунок циклів ГТУ: параметрів в характеристичних точках, корисної роботи і тепла, термічного ККД. Енергобаланс циклу ГТУ.

Тема 19. Методи підвищення теплової ефективності циклу ГТУ

Закриті схеми ГТУ. Цикли ГТУ з регенерацією тепла. Багатоступеневі цикли ГТУ. Схеми. Зображення в термодинамічних діаграмах. Тепловий розрахунок.

Тема 20. Теоретичні цикли холодильних установок

Способи зниження температур. Дросельна і детандерна холодильні установки. Зображення циклів в Т-S діаграмі. Схеми установок. Діаграми IgP-h. Тепловий розрахунок циклів. Кількість тепла, відведеного у холодильній камері. Витрати енергії на компресор і детандер. Холодильний коефіцієнт. Ступінь термодинамічної досконалості циклів.

Тема 21. Цикл паросилової установки

Схема циклу Ренкіна. Зображення циклу в термодинамічних діаграмах. Процеси циклу ПСУ. Тепловий розрахунок циклу ПСУ. Підведене, відведене тепло. Корисна робота, корисне тепло. Термічний ККД. Внутрішній відносний ККД. Дійсний процес розширення пари в турбіні.

Тема 22. Енергобаланс циклу ПСУ

Потужності, втрати, ККД циклу ПСУ. Тепло палива, теоретична потужність, внутрішня потужність, ефективна, електрична потужності. Втрати в конденсаторі, в турбіні, в підшипниках, в генераторі. ККД: котла, термічний, внутрішній відносний, механічний, генератора і цілої ПСУ. Розрахунок абсолютних і відносних ККД.

Тема 23. Методи підвищення теплової ефективності циклу ПСУ

Вторинний перегрів пари, розрахунок. Відбір тиску вторинного перегріву, внутрішній відносний і термічний ККД. Схема установки зі вторинним перегрівом. Комбіноване вироблення електричної і



Національний університет

водного господарства
та природокористування

теплої енергії. Цикл ТЕЦ. Протитискові турбіни і турбіни з відбором. Коефіцієнт використання тепла. Термодинамічні діаграми.

Тема 24. Регенеративний цикл ПСУ

Схема ПСУ з регенеративними відборами. Термічний ККД. Вибір кількості РП (регенеративних підігрівачів). Зображення циклу в термодинамічних діаграмах. Тепловий розрахунок регенеративного циклу ПСУ. Вибір тисків відборів. Поняття ексергії робочого тіла і тепла. Ексергетичний метод оцінки ефективності циклу ПСУ та інших установок, циклів. Порівняння з ентропійним методом і методом ККД.

Тема 25. Комбіновані цикли ТД

Комбіновані цикли теплових двигунів як метод підвищення теплої ефективності, збільшення коефіцієнта використання тепла. Бінарні цикли: ГТУ + ПСУ, ДВЗ + ГТУ; ДВЗ + ПСУ. Цикли з МГД генератором.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

**1.3. Структура навчальної дисципліни**

Назва змістових модулів і тем	Кількість годин																		
	Денна форма						Заочна форма												
	3 семестр						5 семестр												
	Усього	В тому числі						Усього	В тому числі										
Модуль 1																			
Змістовий модуль 1. Газове робоче тіло																			
Тема 1. Параметри Р.Т.	8	2	2	-	-	4	8						8						
Тема 2. Фізичні характеристики	8	2	2	-	-	4	9						9						
Тема 3. Газові суміші	10	2	2	-	2	4	13	2		2			9						
Тема 4. 1 закон термодинаміки	8	2	2	-	-	4	9						9						
Тема 5. Газові процеси	8	2	2	-	2	4	13	2		2			9						
Тема 6. Аналіз процесів	10	2	2	-	2	4	9						9						
Модуль 2																			
Змістовий модуль 2. Реальне робоче тіло																			
Тема 7. Диф. рівняння терм.	8	2	2	-	-	4	8						8						
Тема 8. Водяна пара	10	2	2	-	2	9	13	2		2			9						
Тема 9. h-S діаграма вод. пари	11	2	2	-	2	5	11	2					9						
Тема 10. Процеси вод. пари	10	2	2	-	2	4	11			2			9						
Тема 11. Вологе повітря	8	2	2	-	-	4	9						9						
Тема 12. h-d діаграма	8	2	2	-	-	4	13	2		2			9						
Тема 13. Витікання Р.Т.	8	2	2	-	-	4	9						9						
РГР	12	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-		-						
Залік	6	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-		-						
Усього годин за семестр	135	26	26	-	12	71	135	10	-	10			115						
	4 семестр						6 семестр												



Модуль 3

Змістовий модуль 3. Цикли теплових двигунів

Тема 14. 2 з-н термодинам.	6	2	-	-	-	4	9				9
Тема 15. Поршн. компресор	8	2	2	-	-	4	11		2		9
Тема 16. 2 ст. поршн. компр.	10	2	-	2	2	4	10				10
Тема 17. Цикли ДВЗ	10	2	2	2	-	4	11		2		9
Тема 18. Цикли ГТУ	15	2	2	2	4	5	9				9
Тема 19. Методи підв. еф. ГТУ	7	2	-	-	-	5	11		2		10
Тема 20. Цикли хол. уст-ок	10	2	-	2	2	4	9				9
Тема 21. Цикл ПСУ	13	2	2	2	2	5	11		2		9
Тема 22. Енергобаланс ПСУ	11	2	2	-	2	5	10				10
Тема 23. Методи підв. еф. ПСУ	9	2	-	-	2	5	9				9
Тема 24. Регенерат. цикл	15	2	2	2	4	5	10				10
Тема 25. Комбіновані цикли	6	2	-	-	-	4	9				9
Курсова робота	18	-	-	-	-	18	18				18
Іспит	6	-	-	-	-	6	6				6
Усього годин за семестр	144	24	12	12	18	78	144	-	8		136
Усього годин за навч. рік	279	50	38	12	30	149	279				151



2. Методичні рекомендації до вивчення дисципліни

Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ

Тема 1. Параметри стану РТ

Технічна термодинаміка вивчає найбільш ефективні способи перетворення первинної енергії (ПЕР) в корисні види енергії (теплову, механічну, електричну). Ці перетворення здійснюються у теплових двигунах (ТД) за допомогою робочого тіла (гази, продукти згоряння, водяна пара) – РТ, фізичний стан якого характеризується параметрами:

- P – питомий тиск, Н/м²;
- t – температура, °C;
- v – питомий об’єм, м³/кг.

Енергетичний стан РТ характеризується параметрами:

- u – внутрішня енергія, Дж/кг;
- h – ентальпія, Дж/кг;
- s – ентропія, Дж/кг·К.

2.1. Фізичні параметри стану РТ

– Питомий тиск Р – сила, яка діє на одиницю поверхні

У системі «SI» вимірюється в Па [Н/м²], або 1 кПа = 10³ Па, 1 МПа = 10⁶ Па, 1 бар = 10⁵ Па.

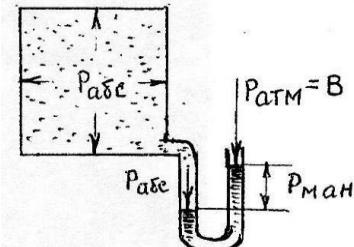
Оскільки зустрічається ще технічна і фізична атмосфера, потрібно знати перевідні коефіцієнти:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 750 \text{ мм Mg} = 10,2 \text{ м H}_2\text{O};$$

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/m}^2 = 735,6 \text{ мм Hg} = 10 \text{ м H}_2\text{O};$$

$$1 \text{ Ат} = 760 \text{ мм Hg} = 10,33 \text{ м H}_2\text{O}.$$

Розрізняють тиск абсолютний, атмосферний (барометричний) і надлишковий (манометричний).



$$P_{abs} = P_m + P_{atm}$$

У разі розрідження (вакуума)

$$P_{abs.vak.} = P_{atm} - P_{vak.}$$

Рис. 2.1. Визначення абсолютноного тиску



Тільки абсолютний тиск є параметр стану. Якщо на практиці не має барометра, то до манометричного тиску потрібно додати одиницю і тільки після цього можна підставляти тиск у розрахункові формули.

– Питомий об'єм $v = \frac{V}{M} \frac{m^3}{kg}$ – є об'єм 1 кг газу.

Густина $\rho = \frac{M}{v} = \frac{M}{V} \frac{kg}{m^3}$ – є маса 1 м³ газу.

– Температура пов'язана з внутрішньою енергією мікро частин газу, і яка складається з кінетичної і потенціальної енергій. Для газу, який наближається до ідеального РТ, відкидаємо потенціальну складову, оскільки нехтуємо об'ємом молекул і силами взаємодії між ними. Згідно молекулярно-кінетичної теорії газу (МКТ) Т і Р пов'язані з кінетичною енергією молекул: $T = f_1\left(\frac{mW^2}{2}\right)$,

$P = f_2\left(\frac{mW^2}{2}\right)$. Температура визначається кінетичною енергією молекул

$$T = \frac{u_k}{c_v} = \frac{N'}{c_v} \cdot \frac{mW^2}{2}$$

тиск є результат дії молекул на стінки посудини

$$P = \frac{2}{3} \cdot \frac{N'}{v} \cdot \frac{mW^2}{2} = \frac{2}{3} \frac{u_k}{v}$$

Звідси легко визначається рівняння стану газового РТ:

$$Pv = PT \text{ – для 1 кг РТ}$$

$$PV = MRT \text{ – для Мкг}$$

$$Pv\mu = \mu RT \text{ – для 1 кмоля.}$$

В цих рівняннях:

u_k – кінетична енергія 1 кг газу;

N' – кількість молекул в 1 кг газу;

C_v – масова ізохорна теплоємність, Дж/кг·К;

$\frac{mW^2}{2}$ – кінетична енергія 1 молекули газу;



R – газова стала, Дж/кг·К;

μR – універсальна газова стала, Дж/кмоль·К;

μ – молекулярна маса кмоля, кг/кмоль;

μv – об'єм одного кмоля, м³/кмоль;

Температура вимірюється в градусах стоградусної шкали – °C, або в градусах Кельвіна – K

$$TK = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273.$$

1.2. Енергетичні параметри стану PT

Внутрішня енергія газу – енергія руху мікрочастин, визначається:

$$u = c_v T, \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta u = c_v \Delta T, \text{ кДж/кг}$$

$$du = c_v dT, \text{ кДж/кг}$$

u – незалежна змінна величина, однозначно визначається температурою, не залежить від характеру процесу, du – є повний диференціал.

При нагріві газу у ізохорному процесі ($v = \text{const}$), енергія у формі тепла витрачається тільки на нагрів газу. [рис. 1-2, а].

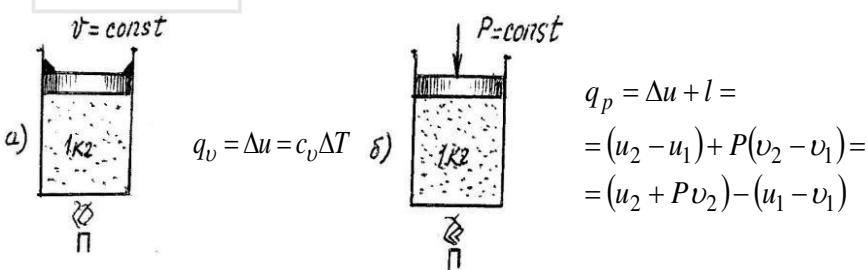


Рис. 1.2. Нагрів газу при $v - \text{const}$ і при $P - \text{const}$

При нагріві газу у ізобарному процесі тепло витрачається на підвищення температури на ту саму величину і крім того газ буде розширюватись, здійснювати роботу проти зовнішнього тиску P. Ця робота визначається як добуток $l = P \cdot \Delta v$ (рис. 1.2, б). Величина $h = u + Pv$ – характеризує повну енергію газу у початковому і кінцевому стані і має називу – ентальпія.



$h = u + Pv = c_v T + RT = c_p T$, так як згідно рівняння Майера

$$c_p = c_v + R. \quad c_p - \text{ізобарна теплоємність.}$$

Розрахункові формулі ентальпії:

$$h = c_p T, \frac{\kappa \Delta s}{\kappa_2}, \quad \Delta h = c_p \Delta T; \quad dh = c_p dT.$$

h – незалежна змінна величина, не залежить від характеру процесу і однозначно визначається температурами у кінцевому і початковому стані, dh – є повний диференціал, тобто h – є параметр стану.

Ентропія – $S \left[\frac{\kappa \Delta s}{\kappa_2 \cdot K} \right]$ – розрахункова величина, яка згідно з рівнянням Клазіуса $dS = \frac{\delta q}{T}$, або $\delta q = TdS$. Як бачимо S визначає знак q (T завжди додатня).

Зі збільшенням S тепло підводиться і, навпаки, зі зменшенням S тепло відводиться від PT .

Для ізольованої термодинамічної системи, коли відсутній теплообмін системи з навколошнім середовищем, запас енергії у системі зберігається, однак PT з часом охолоджуються, температура зменшується, а так як $q = const$, S повинна зростати. Зі зменшенням T , або зі збільшенням S працездатність PT зменшується і, навпаки, зі зменшенням S працездатність PT зростає, бо зростає температурний потенціал.

Таким чином, S характеризує енергетичну ектенсивність PT , а також вказує напрямок природних процесів, які відбуваються зі зменшенням T і збільшенням S , PT прямує до більш імовірного стану.

Тема 2. Теплофізичні характеристики газового РТ

З МКТ відомі рівняння:

наслідок закону Авогадро $v\mu = 22,4 \frac{m^3}{кмоль}$ – об'єм 1 кмоля різних газів при нормальних фізичних умовах $P_n = 760 \text{ ммртст}$



$$P_H = \frac{760}{750} = 1,013 \text{ бар} = 101333 \text{ Па} \text{ і } t_H = 0^\circ \text{C} (T_H = 273 \text{ K}).$$

Універсальна газова стала різних газів при нормальніх фізичних умовах з рівняння стану для 1 кмоль визначається

$$\mu R = \frac{\mu_H \cdot \mu_v}{T_H} = \frac{101333,224}{273} = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}} = 8,314 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}}$$

Мольна теплоємність згідно закону Дюланга і Пті

$$\mu C = \text{const}$$

При нормальних фізичних умовах ізохорна мольна теплоємність

$$\mu C_v = i \cdot 4,157, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}}$$

Ізобарна мольна теплоємність згідно рівняння Майера

$$\mu C_p = \mu C_v + 8,314, \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}}.$$

Пам'ятаючи молекулярні маси для газів

($\mu_{O_2} = 32 \text{ кг/кмоль}$, $\mu_{N_2} = 28$; $\mu_{CO} = 28$; $\mu_{CO_2} = 44$; $\mu_{SO_2} = 64$; $\mu_{H_2O} = 18$; $\mu_{\text{пов(сухого)}} = 29$) можливо визначити:

v_i , ρ_i , R_i , c_v , c_p а також привести питомий об'єм або густину до інших фізичних умов, використовуючи об'єднаний Закон Бойля-Маріотта і Гей-Люссака:

$$\frac{P_i v_i}{T_i} = \frac{P_H v_H}{T_H}.$$

Всі ці теплофізичні характеристики пов'язані між собою рівнянням переходу («ланцюжка»):

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{c_2}{c_1}$$

Значення теплофізичних характеристик більш точніше можна обрати з довідника.

Важливої теплофізичною характеристикою є теплоємність – кількість тепла, необхідна для нагріву одиниці газу на один градус.

Аналітичний вираз $c = \frac{\delta q}{dt}$. Теплоємність використовується для ви-



значення кількості тепла $\delta q = cdt$.

В залежності від одиниці кількості РТ розрізняють:

- масова теплоємність c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{гр}}$;
- об'ємна теплоємність c , $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{гр}}$;
- мольна теплоємність μc , $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{гр}}$

формули переходу: $c = \frac{\mu C}{\mu}$; $c' = c \cdot \rho$; $c = c' \cdot v$.

У залежності c від характеру процесу теплоємності бувають:

- політропна – c
- ізобарна – c_p
- ізохорна – c_v

Для адіабатного процесу $c = \frac{\delta q}{dt} = \frac{0}{dt} = 0$.

Для ізотермічного процесу $c = \frac{\delta q}{dt} = \frac{dt}{0} = \infty$.

Тобто для цих процесів теплоємність не існує.

З рис. 1.2. $q_v = c_v \Delta T$.

$$q_p = c_p \Delta T = c_v \Delta T + R \Delta T.$$

Звідси встановлюємо $c_p = c_v + R$ – рівняння Майера, або $\mu C_p = \mu C_v + 8,314$.

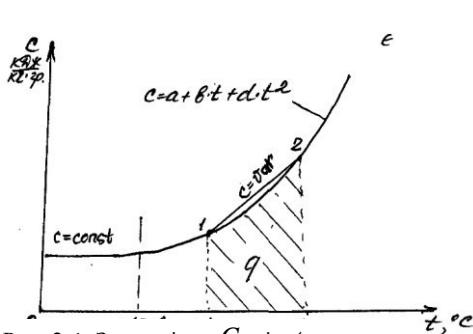
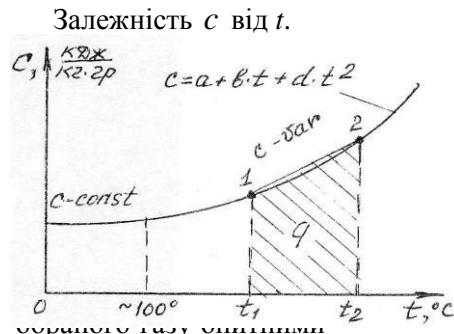


Рис. 2-1. Залежність C від t



Залежність c від t .



коєфіцієнтами a, b, d .

При $c = const$, тепло $q = c\Delta t, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

При $c = var$, тепло $q = \int_{t_1}^{t_2} c dt = c_m \left| \begin{array}{l} t_2 \\ t_1 \end{array} \right| \cdot \Delta t$.

При $c = const$ в межах $t = 0 \div 100^\circ\text{C}$ теплоємності розраховуються з формул:

$$\mu C_v = i \cdot 4,157$$

$$\mu C_p = \mu C_v + 8,314$$

Таблиця 2-1

Газ	i	$\mu C_v, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}\cdot\text{К}}$	$\mu C_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}\cdot\text{К}}$
1 ат	3	12,5	20,8
2 ат	5	20,8	29,1
3 ат	7	29,1	37,4

$$c_v = \frac{\mu C_v}{\mu}; c_p = \frac{\mu C_p}{\mu}; c_v = c_v \cdot \rho; c_p = c_p \cdot \rho$$

При $t > 100^\circ\text{C}$ C обираються з таблиці довідника і тепло визначається як

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt = c_m \left| \begin{array}{l} t_2 \\ t_1 \end{array} \right| \cdot \Delta t = c_m \left| \begin{array}{l} t_2 \\ 0 \end{array} \right| \cdot t_2 - c_m \left| \begin{array}{l} t_1 \\ 0 \end{array} \right| \cdot t_1$$

$$c_m \left| \begin{array}{l} t_2 \\ t_1 \end{array} \right| = \frac{c_m \left| \begin{array}{l} t_2 \\ 0 \end{array} \right| \cdot t_2 - c_m \left| \begin{array}{l} t_1 \\ 0 \end{array} \right| \cdot t_1}{t_2 - t_1}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{град}}.$$

Середні теплоємності в межах від 0 до заданої t обираємо для різних газів з довідника – $c_m \left| \begin{array}{l} t \\ 0 \end{array} \right|$.

Для політропних процесів

$$Q = V \cdot c \cdot \Delta T, \text{кДж}$$

$$Q = I \cdot c \cdot \Delta T, \text{кал}$$



Для ізохори

$$Q = V \cdot c_v \cdot \Delta T, \text{ кДж},$$

$$Q = M \cdot c_v \cdot \Delta T, \text{ кДж}.$$

Для ізобари

$$Q = V \cdot c_p \cdot \Delta T, \text{ кДж},$$

$$Q = M \cdot c_p \cdot \Delta T, \text{ кДж}.$$

Відношення $\frac{c_p}{c_v}$ позначаємо через K – показник адіабати.

$$K = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\dot{c}_p}{\dot{c}_v} = \frac{\mu c_p}{\mu c_v}$$

З врахуванням рівняння Майєра визначаємо

$$c_v = \frac{R}{R+1}; c_p = \frac{KR}{R+1}.$$

Тема 3. Газові суміші

В ТД найчастіше використовують, як робоче тіло, не однорідні гази, а газову суміш. Наприклад, повітря, продукти згоряння палива, газ-фреон і таке ін.

Газова суміш – це суміш хімічно нейтральних газів, які не взаємодіють між собою.

Для газової суміші також можна записати рівняння

$$P_c v_c = R_c T_c; \mu_c v_c = const; \mu_c R_c = 8314; \mu_c C_c = const.$$

Маса суміші $M_c = \sum_i^n M_i$, об'єм $V_c = \sum_i^n V_i$.

Згідно закону Дальтона $P_c = \sum_i^n P_i$.

Тут M_i – маса компонента; V_i – зведений об'єм, P_i – парціальний тиск.

V_i – об'єм компонента при P_c і T_c .

P_i – тиск компонента при V_c , T_c .



Способи завдання газової суміші:

- масовий $M_c = \sum_i^n M_i; 1 = \sum_i^n \frac{M_i}{M_c} = \sum_i^n g_i$, g_i – масова частка;
- об'ємний $V_c = \sum_i^n V_i; 1 = \sum_i^n \frac{V_i}{V_c} = \sum_i^n r_i$, r_i – об'ємна частка.

Приклад: склад повітря в об'ємних частках

$$r_{O_2} = 0,21; r_{N_2} = 0,79;$$

склад повітря в масових частках $g_{O_2} = 0,23; g_{N_2} = 0,77$.

Формула переходу

$$r_i = \frac{V_i}{V_c} = \frac{\nu_i M_i}{\nu_c M_c} = \frac{\nu_i}{\nu_c} g_i = \frac{\rho_c}{\rho_i} g_i = \frac{\mu_c}{\mu_i} g_i = \frac{R_i}{R_c} g_i = \frac{C_i}{C_c} g_i$$

З цього рівняння визначаємо всі теплофізичні характеристики для газової суміші.

Молекулярна маса суміші μ_c , кг/моль

$$\mu_c \cdot g_i = r_i \mu_i; \quad \mu_c \sum_i^n g_i = \sum_i^n r_i \mu_i; \quad \mu_c = \sum_i^n r_i \mu_i; \quad \mu_c = \frac{1}{\sum_i^n \frac{g_i}{\mu_i}}$$

Газова стала суміші R_c

$$R_c = \frac{8314}{\mu_c}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad R_c = \sum_i^n R_i g_i; \quad R_c = \frac{1}{\sum_i^n \frac{r_i}{R_i}}$$

Питомий об'єм суміші ν_c , м³/кг, густина ρ_c

$$\nu_c = \sum_i^n \nu_i g_i \quad \rho_c = \frac{1}{\nu_c}, \text{ кг/м}^3;$$

Перехід від r_i до g_i і навпаки: $r_i = \frac{\mu_c}{\mu_i} g_i; g_i = \frac{\mu_i}{\mu_c} r_i$;

Теплоємність суміші c_c , кДж/кг·К. З рівняння теплового ба-



$$\text{лансу } M_c \cdot c_c \cdot T_c = \sum_i^n M_i \cdot c_i \cdot T_i; \quad c_c = \sum_i^n g_i c_i;$$

$$V_c \cdot c_c' \cdot T_c = \sum_i^n V_i \cdot c_i' \cdot T_i; \quad c_c' = \sum_i^n r_i c_i'.$$

Парціальний тиск компонента суміші – P_i

Рівняння Клайперона-Менделеєва для суміші і компоненти суміші

$$\begin{aligned} P_i V_c &= M_i R_i T_c & P_i &= \frac{R_i}{R_c} \cdot g_i \cdot P_c; \\ P_c V_c &= M_c R_c T_c \end{aligned}$$

Або з закону Бойля-Маріота

$$P_i V_c = P_c V_i \quad P_i = r_i P_c$$

Тема 4. Перший закон термодинаміки

4.1. Поняття енергії, тепла, роботи

Енергія – кількісна міра руху матерії, положення, будови тіла, внутрішніх і зовнішніх зв’язків і таке ін. Сьогодні відомо у науці більше 20 видів енергії (кінетична, потенціальна, теплова, хімічна, внутрішня, електромагнітна, гравітаційна, електрична, магнітна, атомна, термоядерна, сонячна, вітрова, гідроенергія, анігіляційна, пружністна, енергія телепатії та інші).

В системі «SI» енергія, робота, теплота вимірюється у Дж = н·м. потужність у Вт = $\frac{\text{Дж}}{\text{с}}$.

Вироблення енергії на протязі години

$$1 \text{ кВт год} = 1 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} \cdot 3600 \text{ с} = 3600 \text{ кДж.}$$

$$10^3 \text{ Дж} = 1 \text{ кДж}; \quad 10^6 \text{ Дж} = 1 \text{ МДж.}$$

Поряд з тим в інших системах зустрічаються у теплотехніці: ккал, кГм, кс, тому треба знати співвідношення між ними.

$$1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж}$$

$$1 \text{ кс} = 75 \frac{\text{кГм}}{\text{с}}$$

$$1 \text{ кГ} = 9,81 \text{ Н}$$

$$1 \text{ кВт г} = 860 \text{ ккал} = 1,36 \text{ ксг}$$

$$1 \text{ кГм} = 9,81 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ ксг} = 632 \text{ ккал}$$

$$102 \text{ кГм} = 1 \text{ кДж}$$

$$1 \text{ ккал} = 427 \text{ кГм}$$



$$1,36 \text{ кс} = 1 \text{ кВт}$$

$$1 \frac{\text{ккал}}{\text{год}} = 1,163 \text{ Вт}$$

$$1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж} = 427 \text{ кГм} = \frac{1}{860} \text{ кВт} = \frac{1}{632} \text{ кгс}$$

(кіло – 10^3 ; мега – 10^6 ; гіга – 10^9 ; мілі – 10^{-3} ; мікро – 10^{-6}).

Теплота (тепло), робота – це дві форми взаємодії термодинамічної системи (тіла) з навколошнім середовищем. При наявності температурного потенціалу $\Delta T \neq 0$, енергія передається у формі тепла (мікроскопічний спосіб передачі енергії).

При наявності ізобарного потенціалу $\Delta P \neq 0$, енергія передається у формі роботи (макроскопічна форма передачі енергії).

Розрахункові формули: тепло $\delta q = cdT, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

$$\delta q = TdS, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\text{робота } \delta l = Pdv, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

q, l – залежать від характеру процесу.

4.2 Математичний вираз першого закону термодинаміки

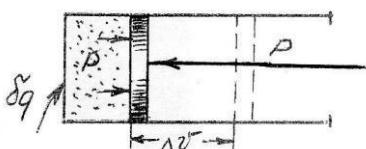


Рис. 4.1. Нагрів газу

Якщо до 1 кг газу, який знаходиться у циліндрі під поршнем підводити безмежно малу кількість тепла δq , то газ буде нагріватись і розширятись. При нагріві змінюється внутрішня енергія

$du = c_i - dT$ і здійснюється робота розширення проти зовнішнього тиску P .

$$\delta l = Pdv. \text{ Таким чином } \delta q = du + \delta l,$$

$$\text{або } q = \Delta u + l.$$

Тепло підведене до РТ витрачається на зміну внутрішньої енергії і на здійснення роботи зміни об'єму.

Правило знаків:

+ q – тепло підводиться до РТ;



- $-q$ – тепло відводиться від РТ;
- +1 – робота розширення;
- 1 – робота стиску.

Аналіз: I закону термодинаміки

- 1) політропний процес $q = \Delta u + l$; $\delta q = du + \delta l$;
- 2) $v = const$ $l = 0$ $q = \Delta u$; $\delta q = du$;
- 3) $P = const$ $q = \Delta u + l$; $\delta q = du + \delta l$;
- 4) $T = const$ $\Delta u = 0$; $q = l$; $\delta q = \delta l$;
- 5) $S = const$ $\delta q = 0$; $\Delta u = -l$ – стиск адіабатний;
 $q = 0$ $-\Delta u = l$ – розширення адіабати

Робота $\delta l = Pdv$; $l = \int_1^2 Pdv$;

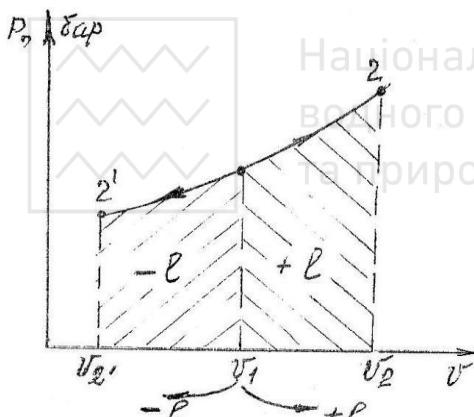


Рис. 4.2. Робоча діаграма

Зображення роботи в координатах $P-v$. Геометричний зміст інтегралу для процесу 1-2 – зображається площею під процесом. Якщо об’єм зменшується – робота стиску, при збільшенні об’єму – робота розширення. Якщо процес змінюється, то змінюється площа, тобто $l = f(\text{процесу})$.

При $v = const$ $l = 0$;

При

$$P = const \quad l = p\Delta v = R\Delta T;$$

$$\text{При } T = const \quad l = \int_1^2 pdv = RT_1 \int_1^2 \frac{dv}{v} = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = RT_1 \ln \frac{p_1}{p_2};$$

$$\text{При } q = 0 \quad l = -\Delta u = c_v(T_1 - T_2) = \frac{k}{k-1}(T_1 - T_2);$$



$$c_p = c_v + R; \quad \frac{c_p}{c_v} = k - 1; \quad k - 1 = \frac{R}{c_v}; \quad c_v = \frac{R}{k - 1}.$$

З врахуванням $Pv = RT$ $l = \frac{1}{K-1}(p_1v_1 - p_2v_2)$, $\frac{\Delta\mathcal{J}}{\kappa\varepsilon}$.

Для політропи аналогічно

$$n - \text{показник політропи} \quad l = \frac{r}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{1}{n-1}(p_1v_1 - p_2v_2);$$

$$\text{Теплота} \quad \delta q = Tds; \quad q = \int_1^2 Tds, \quad \frac{\Delta\mathcal{J}}{\kappa\varepsilon}.$$

В T - S координатах q зображається площею під процесом.

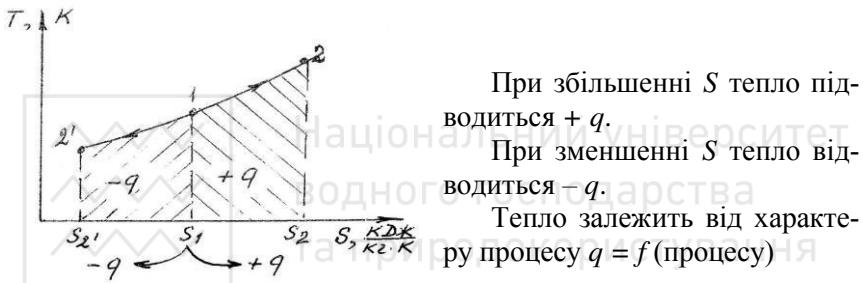


Рис. 4.3. Теплова діаграма

При $v = \text{const}$ $q = c_v \Delta T$; $q = \Delta u$;

При $P = \text{const}$ $q = c_p \Delta T$;

При $T = \text{const}$ $q = T$; $As = l$;

При $S = \text{const}$ $q = 0$.

Політропний процес $q = \Delta u + l$; $q = c \Delta T$.

Представимо перший закон термодинаміки через h :

$$h = u + Pv; \quad dh = du + pdv + vdp.$$

Підставляємо у рівняння

$$\delta q = du + \delta l = dh - pdv + vdp + pdv = dh - vdp.$$

Позначаємо роботу зміни тиску через $\delta l_T = -vdP$ – технічна робота.

Таким чином, $\delta q = du + \delta l$ (1)

$$\delta q = dh - \delta l_T \quad (2)$$

$$\delta l = pdv$$

$$\delta l_T = vdp$$

дві форми запису першого закону термодинаміки через внутрішню енергію (1) і через ентальпію (2). Якщо РТ рухається, тоді тепло витрачається на зміну його повної енергії – ентальпії dh і на зміну кінетичної енергії потоку wdw . Таким чином є третя форма запису першого закону термодинаміки для рухомого РТ (3).

$$\delta q = dh + wdw. \quad (3)$$

Тема 5. Газові процеси

5.1. Види процесів, їх рівняння

Процес – послідовна зміна стану газу від початкового до кінцевого внаслідок енергетичної взаємодії з навколошнім середовищем. Існує безмежна кількість процесів, їх загальна назва політропні. Є частні випадки коли один з параметрів не змінюється (ізохора – $v = const$, ізотерма – $p = const$, ізотерма – $T = const$, адіабата $s = const$, або $q=0$).

Ідеальні обертальні процеси відбуваються без втрат енергії на тертя і протікають у прямому і зворотньому напрямку через ті ж самі рівноважні стани – теплова і механічна рівновага, T і P однакові з навкіллям.

Рівняння політропи. Приймаємо $c = const$.

$$\delta q = di - vdp \quad (2); \quad cdt = c_p dt - vdp; \quad (c - c_p) = vdp;$$

$$\delta q = du + pdv \quad (1); \quad cdt = c_v dt + pdv; \quad (c - c_v) = -pdv.$$

Ділимо перше рівняння на друге і позначаємо

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} \quad \text{– показник політропного процесу } n = 0 \div \infty \text{ може бути}$$

додатнім і від'ємним.

Отримуємо диференціальне рівняння $n = \frac{vdP}{Pdv}$, яке після розв'язання приведе до рівняння політропи:

$$pv^n = const.$$

Якщо враховувати для адіабати $\delta q = 0$; $K = \frac{c_p}{c_v}$ отримуємо рівняння адіабати:



$$pv^k = \text{const.}$$

При $n = 0$ отримуємо ізобару $P = \text{const.}$

При $n = 1$ отримуємо ізобару $Pv = \text{const.}$

При $n = K = \frac{C_p}{C_v} \approx 1,4$ отримуємо адіабату $Pv^k = \text{const.}$

При $n = \infty$, отримуємо ізохору $v = \text{const.}$

Співвідношення параметрів у процесах

Базуючись на рівняннях $Pv = RT$, $Pv^n = \text{const}$ отримуємо

При $v = \text{const}$ $\frac{P}{T} = \text{const.}$

При $p = \text{const}$ $\frac{v}{T} = \text{const.}$

При $T = \text{const}$ $Pv = \text{const.}$

При $q = 0, \delta q = 0; \delta q = TdS$, тобто $S = \text{const}$ $Pv^K = \text{const}$,

$P = \frac{RT}{v}$ підставляємо у $Pv^K = \text{const}$ $Tv^{K-1} = \text{const}$,

або $v = \frac{RT}{p}$ підставляємо у $Pv^K = \text{const}$ $TP^{\frac{1-K}{K}} = \text{const}$,

Технічна робота $\delta l_T = -vdP$; $l_T = \int_{P_2}^{P_1} vdP$.

У діаграмі роботи l_T зображається площею, яка проектується на вісь P .

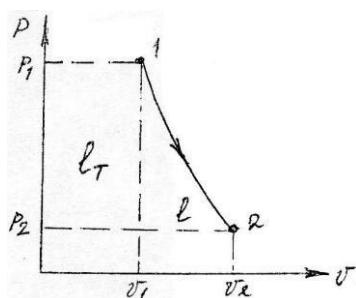


Рис. 5.1. Робота

$$l_T = \Delta h;$$

$$1) P = \text{const} \quad l_T = 0;$$

$$2) v = \text{const} \quad l_T = v\Delta P = R\Delta T;$$

$$3) T = \text{const} \quad l_T = RT \int \frac{dP}{P} =$$

$$RT_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = -RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1};$$

$$4) S = \text{const} \quad \text{з рівняння (2)}$$



5) політропа

$$l_T = \int_{P_2}^{P_1} \nu dP = C^{te} \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{P^{\frac{1}{n}}} = \frac{n}{n-1} (P_1 \nu_1 - P_2 \nu_2) = \frac{nR}{n-1} (T_1 - T_2) = nl.$$

Теплоємність

$$\nu = const \quad c = c_v$$

$$P = const \quad c = c_p$$

$$T = const \quad c = \infty$$

$$q = 0 \quad c = 0.$$

$$\text{Політропа } n = \frac{c - c_p}{c - c_v} \text{ звідси } c = c_v \cdot \frac{n - K}{n - 1}.$$

Розрахункові формули теплоти

$$q = c \Delta T \quad q = \Delta h - l_T$$

$$q = \Delta u + l$$

$$q = \int_1^2 T dS$$

Зміна ентропії $dS = \frac{\delta q}{T}$. Підставимо послідовно розрахункові

формули для визначення q , отримуємо:

$$ds = c \frac{dT}{T}; \quad \Delta S = c \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1};$$

$$ds = \frac{du + \delta l}{T}; \quad \Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$ds = \frac{dh - \nu dp}{T}; \quad \Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}.$$

Всі формули справедливі для політропного процесу.

$$\text{При } \nu = const \quad \Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1};$$

$$\text{При } P = const \quad \Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1};$$

$$\text{При } T = const \quad \Delta S = R \ln \frac{v_2}{v_1} = -R \ln \frac{p_2}{p_1};$$

$$\text{При } S = const \quad \Delta S = 0.$$

Таблиця розрахункових формул газових процесів

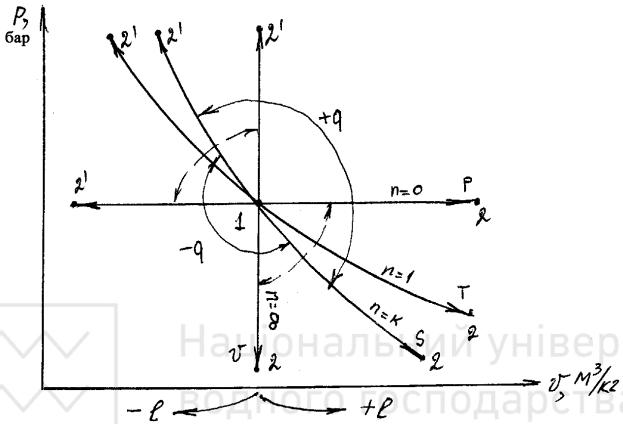
№ з/п	Величина	Познач.	Розмір	Процеси (c=const)				
				$v = const$ $n = \infty$	$P = const$ $n = 0$	$T = const$ $n = 1$	$S = const$ $n = k$	$Pv^n = const$ $Tv^{n-1} = const$ $TP^{\frac{1-n}{k}} = const$
1	Рівняння співвідношення	—	—	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$P_1 v_1 = P_2 v_2$		$Pv^n = const$ $Tv^{n-1} = const$ $TP^{\frac{1-n}{k}} = const$
2	Зміна внутрішньої енергії	Δu	$\frac{\kappa \bar{J} \mathcal{K}}{\kappa \mathcal{Z}}$	$C_v \cdot \Delta T$	$C_v \cdot \Delta T$	0	$C_v \cdot \Delta T$	$C_v \cdot \Delta T$
3	Зміна ентальпії	Δh	$\frac{\kappa \bar{J} \mathcal{K}}{\kappa \mathcal{Z}}$	$C_p \cdot \Delta T$	$C_p \cdot \Delta T$	0	$C_p \cdot \Delta T$	$C_p \cdot \Delta T$
4	Робота зміни об'єму	l	$\frac{\kappa \bar{J} \mathcal{K}}{\kappa \mathcal{Z}}$	0	$P\Delta v = R\Delta T$	$R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = -R T_1 \ln \frac{P_2}{P_1}$	$l = \frac{k}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1}(P_1 v_1 - P_2 v_2)$	$l = \frac{n}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{1}{n-1}(P_1 v_1 - P_2 v_2)$
5	Робота зміни тиску	l_T	$\frac{\kappa \bar{J} \mathcal{K}}{\kappa \mathcal{Z}}$	$v\Delta P = R\Delta T$	0	$R T_1 \ln \frac{P_2}{P_1} = -R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$	$l_T = k \cdot l$	$l_T = n \cdot l$
6	Зміна ентропії	ΔS	$\frac{\kappa \bar{J} \mathcal{K}}{\kappa \mathcal{Z} \cdot K}$	$\Delta S = C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta S = R \ln \frac{v_2}{v_1} = -R \ln \frac{P_2}{P_1}$	$\Delta S = 0$	$\Delta S = C \ln \frac{T_2}{T_1}$ $\Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$ $\Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$
7	Теплота	q	$\frac{\kappa \bar{J} \mathcal{K}}{\kappa \mathcal{Z}}$	$q = C_v \Delta T$	$q = C_p \Delta T$	$q = l$	$q = 0$	$q = C \Delta T$ $q = \Delta u + l$ $q = \Delta h - l_T$
8	Теплоємність	C	$\frac{\kappa \bar{J} \mathcal{K}}{\kappa \mathcal{Z} \cdot K}$	C_v	C_p	$C = \infty$	$C = 0$	$C = C_v \frac{n-k}{n-1}$



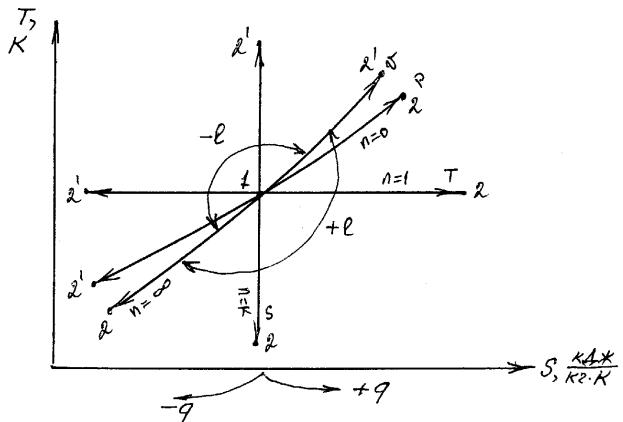
Тема 6. Аналіз газових процесів

6.1. Зображення процесів в термодинамічних діаграмах

Робоча діаграма ($P - v$). Площа під процесами є $l = \int_1^2 P dv$.



Теплова діаграма ($T - S$). Площа під процесами є $q = \int_1^2 T dS$.





Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального PT

Тема 7. Диференціальні рівняння термодинаміки

7.1. Рівняння стану реального газу

Рівняння стану це функціональна залежність $f(P, v, T) = 0$ у диференціальному вигляді

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_v = -1.$$

Часткові похідні можливо знайти для кожного газу окремо експериментально

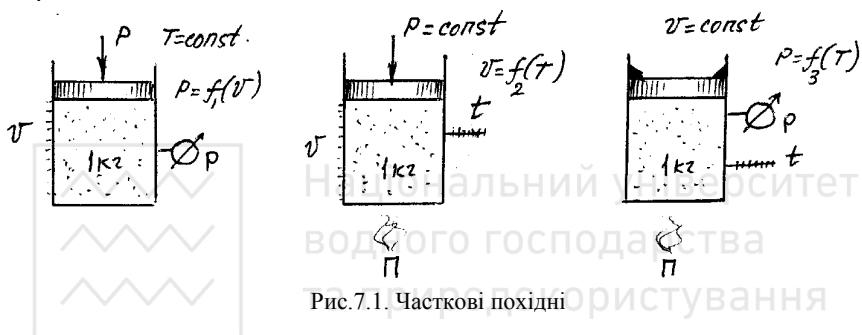


Рис. 7.1. Часткові похідні

7.2. Характеристичні функції термодинаміки

При взаємодії термодинамічної системи, PT з навколошнім середовищем її енергія E залежить від параметрів $E = f(P, v, T, S)$.

Робота	$l = f(P, v)$	$\delta l = P d v;$
Теплота	$q = f(T, S)$	$\delta q = T d S;$
Внутрішня енергія	$u = f(v, S)$	$d u = T d S - P d v;$
Ентальпія	$h = f(P, S)$	$d h = T d S + v d P;$
Вільна внутрішня енергія	$F = f(v, T)$	$d F = -S d T - P d v;$
Вільна енталпія	$\psi = f(P, T)$	$d \psi = -S d T + v d P.$

u - внутрішня енергія, PT - енергія мікточастин;

$F = u - TS$ - вільні внутрішня енергія – корисна частина u без втрат енергії TS ;

h - повна енергія PT є енталпія;

$\psi = h - TS$ - вільна енталпія, корисна частина повної енергії без втрат енергії TS ;



$$dh = dh - d(TS) = TdS + \nu dP - TdS - SdT = \nu dP - SdT;$$

$$dF = du - d(TS) = TdS - Pd\nu - TdS - SdT = -Pd\nu - SdT.$$

7.3. Зображення функцій в діаграмах

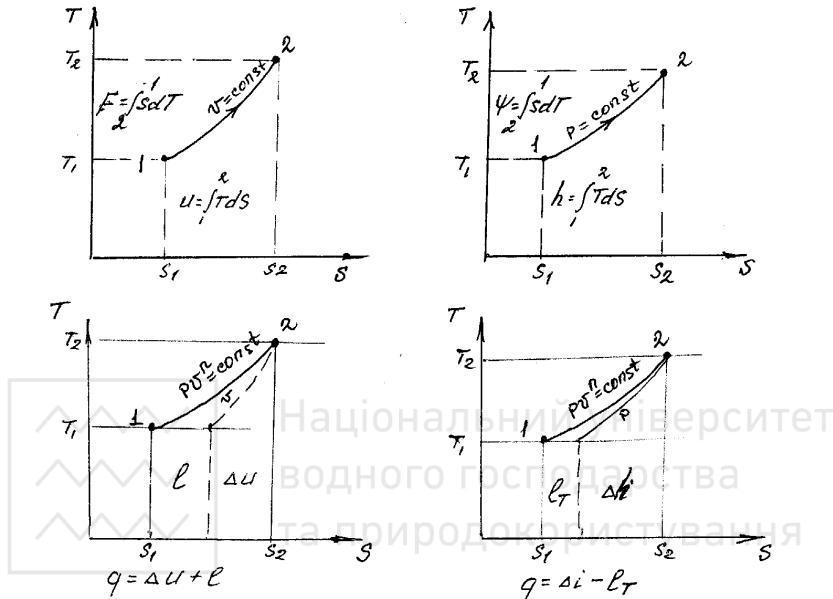


Рис.7.2. $T - S$ діаграми процесів

7.4. Диференціальні спiввiдношення

1) $u(S, \nu)$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial S} \right)_\nu dS + \left(\frac{\partial u}{\partial \nu} \right)_S d\nu; \quad T = \left(\frac{\partial u}{\partial S} \right)_\nu; \quad -P = \left(\frac{\partial u}{\partial \nu} \right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S} \right)_\nu. \quad (1)$$

$$du = TdS - Pd\nu; \quad -P = \left(\frac{\partial u}{\partial \nu} \right)_S; \quad -S = \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_\nu.$$

2) $F(\nu, T)$

$$dF = \left(\frac{\partial F}{\partial \nu} \right)_T d\nu + \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_\nu dT; \quad -P = \left(\frac{\partial F}{\partial \nu} \right)_T; \quad \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\nu = -\left(\frac{\partial S}{\partial \nu} \right)_T. \quad (2)$$

$$dF = -Pd\nu - SdT; \quad -S = \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_\nu;$$



3) $h(S, P)$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial S} \right)_P dS + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_S dP; \quad T = \left(\frac{\partial h}{\partial S} \right)_P; \quad \nu = \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_S; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_S = \left(\frac{\partial \nu}{\partial S} \right)_P. \quad (3)$$

$$dh = TdS + \nu dP;$$

4) $\psi(P, T)$

$$d\psi = \left(\frac{\partial \psi}{\partial P} \right)_T dP + \left(\frac{\partial \psi}{\partial T} \right)_P dT; \quad \nu = \left(\frac{\partial \psi}{\partial P} \right)_T; \quad \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P = - \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T. \quad (4)$$

$$d\psi = \nu dP - SdT; \quad -S = \left(\frac{\partial \psi}{\partial T} \right)_P;$$

Отримані спiввiдношення дають можливiсть в експериментах замiнити не вимiрювану величину ентропiю через iншi вимiрюванi параметри.

7.4. Диференцiальнi спiввiдношення

Внутрiшня енергiя.

$$du = dq - Pd\nu = CdT - Pd\nu; \quad u = f(T, \nu),$$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_\nu dT + \left(\frac{\partial u}{\partial \nu} \right)_T d\nu.$$

$$\text{При } \nu = \text{const} \quad du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_\nu dT; \quad du = C_\nu dT; \quad C_\nu = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_\nu;$$

$$du = TdS - Pd\nu; \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \nu} \right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial \nu} \right)_T - P = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\nu;$$

$$du = C_\nu dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\nu - P \right] d\nu.$$

Енталпiя

$$dh = dq + \nu dP = CdT + \nu dP; \quad i = f(T, P),$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP.$$



При $P = \text{const}$ $dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P dT$; $dh = C_P dT$; $C_P = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P$;

$$dh = TdS + \nu dP; \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_T + \nu = -T \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P + \nu;$$

$$dh = C_P dT - \left[T \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P - \nu \right] dP.$$

Ентропія

$$TdS = du + Pd\nu = C_v dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] d\nu + Pd\nu;$$

$$dS = C_v \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v d\nu;$$

$$TdS = dh - \nu dP = C_P dT - \left[T \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P - \nu \right] dP - \nu dP;$$

$$dS = C_P \frac{dT}{T} + \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P dP.$$

Теплоємність

$$CdT = du + Pd\nu = C_v dT + \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] d\nu + Pd\nu;$$

$$C = C_v + T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \cdot \frac{d\nu}{dT}.$$

При $P = \text{const}$

$$C_P - C_v = T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \cdot \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P;$$

$$CdT = dh - \nu dP = C_P dT - \left[T \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P - \nu \right] dP;$$

$$C = C_P - T \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P \cdot \frac{dP}{dT}.$$



При $v=const$

$$C_P - C_v = T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v .$$

Теплота

$$\delta q = du + Pdv = C_v dT + T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv ;$$

$$\delta q = dh - vdP = C_P dT - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP .$$

7.6. Хімічний потенціал

Встановимо, як змінюються характеристичні функції в залежності від зміни кількості речовини. Всі характеристичні функції - питомі величини. Наприклад, $H = h \cdot M$ (кДж); h (кДж/кг).

$$\left(\frac{\partial H}{\partial M} \right)_{P,S} ?$$

$$dH = d(Mh) = Mdh + hdM = MTdS + MvdP + hdM =$$

$$= TdS - TSdM + MvdP + hdM = \psi dM .$$

тобто

$$\left(\frac{\partial H}{\partial M} \right)_{P,S} = \psi ,$$

аналогічно

$$\left(\frac{\partial F}{\partial M} \right)_{V,T} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial M} \right)_{P,T} = \left(\frac{\partial U}{\partial M} \right)_{V,S} = \psi .$$

Ізобарно-ізотермічний потенціал ψ позначається через μ і має назву хімічний потенціал. Дозволяє розрахувати зміну характеристичних функцій для будь-якої системи в залежності від зміни кількості PT .

7.7. Фазові переходи

Фазовий перехід – перехід PT з одного агрегатного стану в інший. Наприклад, перехід води в пару (кипіння), перехід льоду в рідину (плавлення), перехід льоду у пару (сублімація). Кількість параметрів, які визначають стан PT при різних агрегатних перехо-



дах, визначається по правилу фаз Гіббса $i = k - \Phi + 2$, де

i - кількість ступенів вільності;

Φ - кількість фаз;

k - кількість компонентів.

Наприклад, для води $k = 1$, тоді $i = 3 - \Phi$, кількість фаз $\Phi = 1$, $i = 2$. Необхідно мати два параметри: тиск P і температуру T , щоб визначити стан води.

Стан рівноваги термодинамічної системи, PT визначається термодинамічними потенціалами:

T - термічний потенціал;

P - ізобарний потенціал;

μ - хімічний потенціал.

При наявності будь-якого потенціалу термодинамічна система виходить з рівноважного стану. При наявності $\Delta T \neq 0$ передається енергія у формі тепла. При наявності ізобарного потенціалу здійснюється робота. При наявності хімічного потенціалу здійснюється хімічна реакція.

7.8. Третій закон термодинаміки

Неристом встановлено, що властивості PT близько абсолютноного нуля не залежить від температури і ентропії при абсолютному нулі $S_0 = 0$. В цих умовах відсутній теплообмін. Абсолютний нуль недосяжний. Неможливо охолодити PT до абсолютноного нуля, це означає не можливо мати тепловий двигун з ККД, який би дорівнював одиниці. Абсолютний нуль прийнятий за початок підрахунку ентропії, ентальпії, внутрішньої енергії ($S_0 = h_0 = u_0 = 0$).

Тема 8. Водяна пара

8.1. Рівняння стану

Перше рівняння стану водяної пари було знайдено Ван-дер-Ваальсом

$$\left(P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT,$$

яке враховує сили взаємодії між молекулами і їх об'єм. Сталі a, b залежать від виду газу.

Рівняння якісне відповідає реальним даним для водяної пари.

Точніші рівняння для водяної пари з врахуванням властивості молекул до асоціації були отримані Вукаловичем, Майером.

Були створені таблиці і діаграми водяної пари, які використовуються сьогодні.

8.2. $P - v$ - діаграма водяної пари

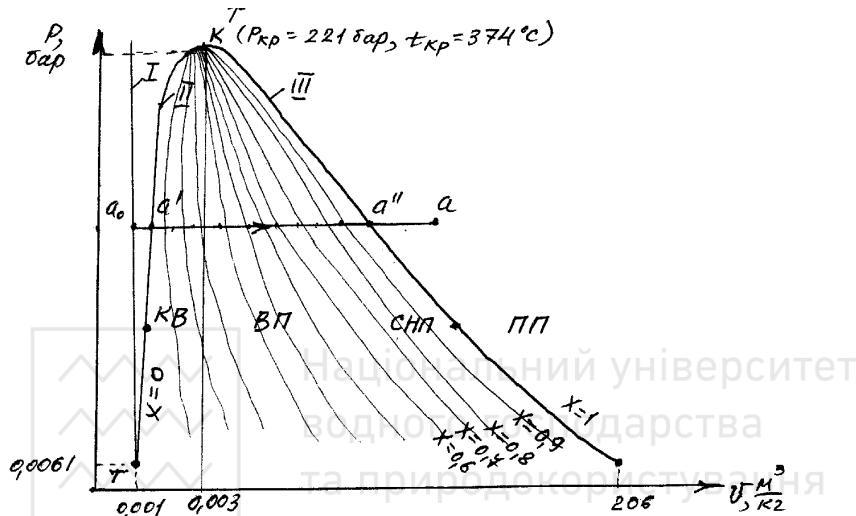


Рис.8.1. $P - v$ - діаграма водяної пари

Процес добування водяної пари відбувається при $P = \text{const}$.

Лінія I – стан води при 0°C і різному тиску.

Лінія II – нижня погранична крива – стан киплячої води (КВ).

Кожному тиску відповідає своє значення температури кипіння (насичення) – t_H . Зі збільшенням тиску t_H

зростає. При $P_T = 0,0061 \text{ бар}$, $t_H = 0,01^\circ\text{C}$. Це потрійна точка води – точка фазової рівноваги води, льоду і пари. При $P_{kp} = 221 \text{ бар}$, вода закипає при

$$t_{kp} = 374^\circ\text{C}.$$

Лінія III – верхня погранична крива де вся вода википає.

Процес добування водяної пари складається з трьох етапів: $a_0 - a'$ - ізобарний нагрів води від 0°C до t_H ; $a' - a''$ - ізобарно-ізотермічний процес пароутворення, вода при сталому значенні P і



t_H википає і перетворюється в точці a'' у суху насычену пару СНП.

$a'' - a$ – ізобарний процес перегріву. Розрізняють три види пари:

- ВП – волога пара – суміш киплячої води і сухої насыченої пари при t_H .
- СНП – суха насычена пара, яка не має вже вологості, однак має ще t_H .
- ПП – перегріта пара, яка має $t > t_H$ при даному тиску.

Волога пара характеризується ступенем сухості

$$x = \frac{M_{CHP}}{M_{KB} + M_{CHP}} = 0 \div 1 \text{ – це концентрація СНП у вологої пари.}$$

При $x = 0$ – початок кипіння, $x = 1$ – вся вода кипляча вода википіла – отримали СНП; $x = 0,8$ – це означає, що така волога пара має 80% сухої насыченої пари і 20% – киплячої води.

Практичний інтерес становить визначення витрат тепла (палива) на отримання заданої пари необхідних параметрів. Тому розглянемо теплову діаграму.

8.3. $T - S$ - діаграма водяної пари

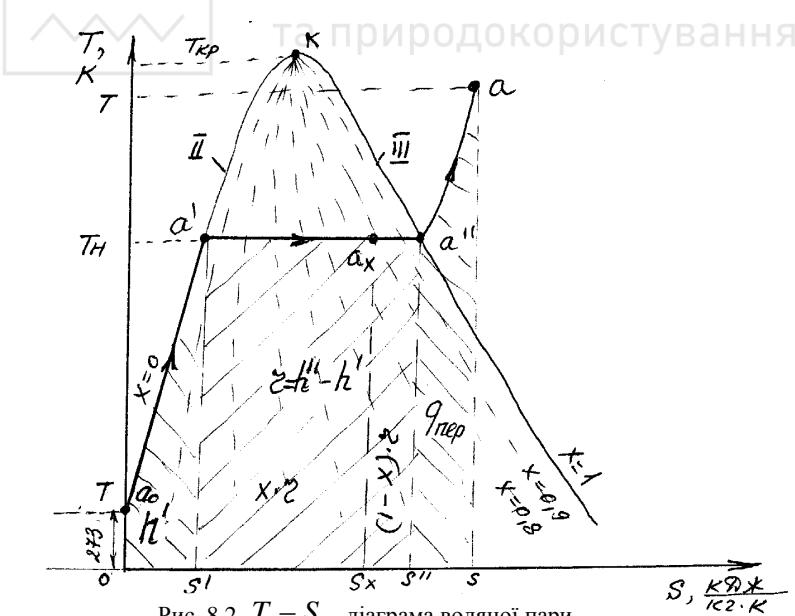


Рис. 8.2. $T - S$ - діаграма водяної пари



Лінія I проектується в точку T , яка розташована на висоті 273° від початку координат. Всі ізобари практично співпадають з нижньою пограничною кривою і здійснюються до t_H , при заданому тиску. Пароутворення відбувається при $T_H = \text{const}$. Процес перегріву відповідає зображенню ізобари у $T - S$ координатах. верхня і нижня пограничні криві будуються по відповідним значенням T_H і S', S'' при різних тисках P .

Тепло зображається площею під процесом:

$$q' - \text{кількість тепла необхідне для нагріву води від } 0^{\circ}\text{C} \text{ до } t_H \\ (\text{процес } a_0 - a') \left[\frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho} \right] (\text{пл. } 0 - T - a' - S');$$

$$r - \text{теплота пароутворення} - \text{кількість тепла, необхідна для переводу 1 кг киплячої води при } P = \text{const} \text{ у СНП } (a' - a'') \left[\frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho} \right] \\ (\text{пл. } a' - a'' - S'' - S');$$

$$q_{nep} - \text{теплота перегріву} \left[\frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho} \right] (\text{пл. } a - S - S'' - a'').$$

В ізобарному процесі тепло визначається як різниця ентальпій $\sigma q = dh - vdP$, $\sigma q = dh$, $q = \Delta h$, $dP = 0$, тобто

$$q' = h'(h_0 = 0); r = h'' - h'; q_{nep} = h - h''.$$

Загальна кількість тепла $q = h = q' + r + q_{nep}$ – є площа від початку координат до заданої перегрітої пари у точці a . (пл. $0 - a_0 - a' - a - S - 0$).

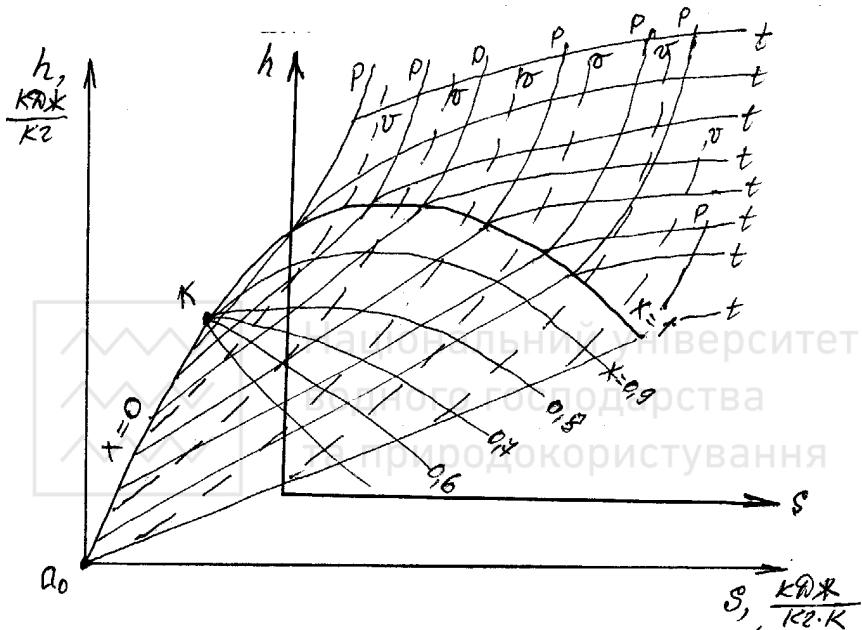
Точка a_x – характеризує стан вологої пари. Оскільки x поділяє процес $a' - a''$ пропорційно, тоді легко визначається кількість тепла, необхідна для нагріву води від 0°C до заданої точки a_x . $h_x = h' + x \cdot r = h' + x(h'' - h') = x \cdot h'' + (x-1) \cdot h'$. Кількість тепла, яке потрібне для перетворення вологої пари з точки a_x у СНП буде дорівнювати $(1-x) \cdot r$ (рис. 8.2).

$$xr - \text{пл. } a' - a_x - S_x - S'; (1-x) \cdot r - \text{пл. } a_x - a'' - S'' - S_x.$$

Для практичного застосування побудована $h - S$ діаграма, де легко визначаються ентальпії для будь-якого стану водяної пари.

**Тема 9. $h - S$ діаграма водяної пари****9.1. Побудова $h - S$ діаграми**

Лінія стану води при $0^\circ C$ і при різному тиску має ентальпії $h_0 = C_P \cdot t_0 = 0$, тому проєктується у початок координат.

Рис. 9.1. $h - S$ діаграма

Лінії II, III будуються по відомим параметрам. Для ізобарного процесу $\sigma q = dh - vdP = dh; vdP = 0$.

$$TdS = dh \left(\frac{\partial h}{\partial S} \right)_P = T = \text{const.}$$

На ділянці вологої пари ізотерми – прямі лінії, які зливаються з ізобарами. Починаючи з верхньої пограничної кривої, вони розходяться – ізобара прямує вверх по кривій, а ізотерма відхиляється направо, створюючи на ділянці перегрітої пари сітку. Будуються також ізохори (пунктирні криві, крутіші ніж ізобари) і лінії однакового ступеня сухості – x .

Оскільки на практиці використовується волога пара при $x > 0,5$,

то осі координат на діаграмі перенесені, як показано на рис. 9.1 і кінцева $h - S$ діаграма, зображена на рис. 9.2.

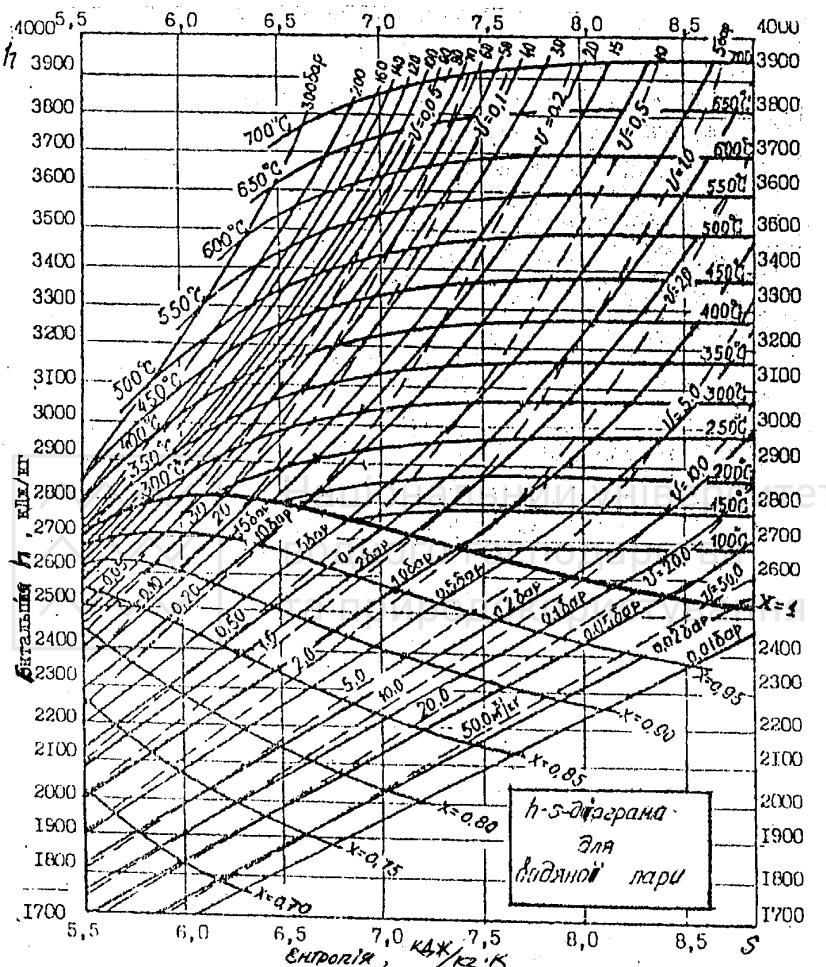


Рис. 9.2. $h - S$ діаграма водяної пари

9.2. Розрахунок параметрів водяної пари

Параметри стану води при $t_0 = 0^\circ C$: $u_0 = i_0 = S_0 = 0$,

$$v_0 = 0,001 \frac{m^3}{kg}$$



Національний університет

водного господарства

та природообристування

Параметри киплячої води на нижній пограничній кривій позначаються зі штрихом: P, v, t_H, u', h', S' .

Визначаються з таблиці водяної пари на лінії насичення по заданому тиску або по t_H , $v' \approx v_0$.

$$q' = \Delta u + l = u' - u_0 + P(v' - v_0) \approx u',$$

$$q' = h' - h_0 = h'. \text{ Ентальпія } h' = C_P \cdot t_H = 4,19 \cdot t_H, \frac{\kappa \text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Вода при будь-якій температурі має $h = 4,19 \cdot t_b$.

Ентропія S' визначається з рівняння $dS = \frac{\sigma q}{T} : \sigma q = C_P dT$.

$$\Delta S = S' - S_0 = S' = C_P \ln \frac{T_H}{273} \left[\frac{\kappa \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]. S_b = 4,19 \ln \frac{T_b}{273}.$$

Параметри вологої пари позначаються з індексом x : $h_x, v_x, u_x, S_x, t_H, P$. Як було встановлено,

$$h_x = h' + x \cdot r = h' + x(h'' - h') = xh'' + (1-x)h', \frac{\kappa \text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Аналогічно:

$$v_x = xv'' + (1-x)v', \frac{m^3}{\text{кг}},$$

$$S_x = xS'' + (1-x)S', \frac{\kappa \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

$u_x = h_x - Pv_x = h_x - 10^2 \cdot P \cdot v_x, \frac{\kappa \text{Дж}}{\text{кг}}$. Тиск у бар. Питомий об'єм $v_x, \frac{m^3}{\text{кг}}$.

Теплота пароутворення $r = h'' - h' = T_H(S'' - S')$, для вологої пари: $x \cdot r = T_H(S_x - S')$, $S_x = S' + \frac{r \cdot x}{T_H}, (1-x) \cdot r = T_H(S'' - S_x)$.

Суха насичена пара (на верхній пограничній кривій) має параметри $P, t_H, v'', h'', u'', S''$.

$$h'' = h' + r; S'' = S' + \frac{r}{T_H}; u'' = h'' - 10^2 \cdot P \cdot v''.$$

Перегріта пара: h, u, S, P, v, t . Обираються з таблиць водяної пари для перегрітої пари по заданих P і t , або з $h - S$ діаграмами.



Тема 10. Процеси водяної пари

Ізохорний процес

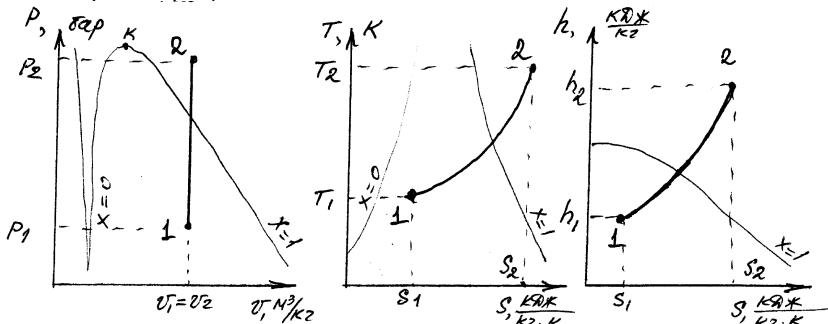


Рис. 10.1

1-2 – ізохорний нагрів;

2-2 – ізохорне охолодження

$$q = \Delta u + l; l = 0; \Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - P_2 v_2) - (h_1 - P_1 v_1) = \\ = (h_2 - h_1) - v(P_2 - P_1); l_T = v_1(P_2 - P_1).$$

Ізобарний процес

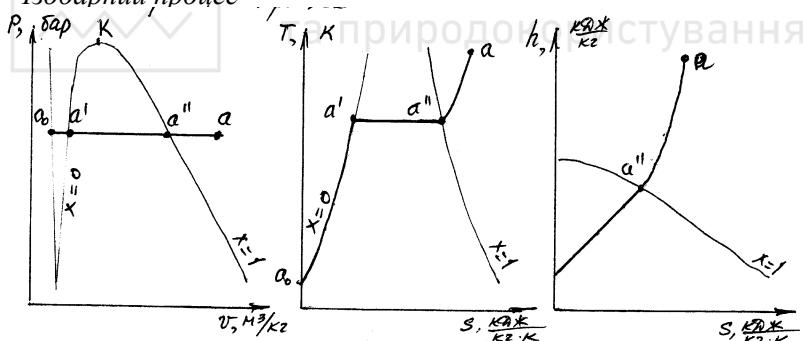


Рис.10.2. Ізобарний процес

$a_0 - a'$ - ізобарний нагрів води до t_H ;

$a' - a''$ - пароутворення; $a'' - a'$ - конденсація;

$a'' - a$ - перегрів;

$l_T = 0$; $l = P(v_2 - v_1)$; $q = h_2 - h_1$;

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - 10^2 P_2 v_2) - (h_1 - 10^2 P_1 v_1) = \Delta h - P \Delta v.$$



Ізотермічний процес

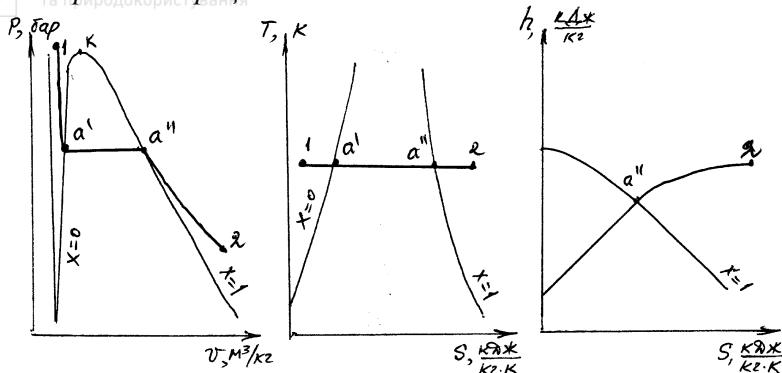


Рис. 10.3
1-2 – ізотермічний нагрів (розширення)

$$q = \Delta u + l; q = T_H(S_2 - S_1); l_T = \Delta h - q; l = q - \Delta u;$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - 10^2 \cdot P_2 v_2) - (h_1 - 10^2 \cdot P_1 v_1).$$



Рис. 10.4
1-2 – адіабатне розширення 2-1 адіабатний стиск

$$q = 0; l = -\Delta u = u_2 - u_1 = (h_1 - 10^2 \cdot P_1 v_1) - (h_2 - 10^2 \cdot P_2 v_2);$$

$$l_T = \Delta h.$$

11.1. Склад вологого повітря

Вологе повітря – суміш сухого повітря M_I і перегрітої пари $M_{\hat{A}}$.

$$M_{\hat{A}\ddot{J}} = M_{\ddot{J}} + M_{\hat{A}}.$$

Барометричний тиск вологого повітря \hat{A} складається з парціальних тисків сухого повітря D_f і перегрітої пари (вологості) $D_{\hat{A}}$.

$$\hat{A} = D_{\hat{J}} + D_{\hat{A}}.$$

Стан перегрітої пари при $D_{\hat{A}}$ і t_{Bi} можна зобразити точкою \hat{A} у $P-v$ діаграмі водяної пари.

При охолодженні повітря у ізобарному процесі $D_A = const$, температура знижується до t_p - температура точки роси, коли пара почне конденсуватись у повітрі і випадати у вигляді роси, туману.

Можна провести охолодження у ізотермічному, або у ізохорному процесах і досягнути відповідного охолодження відбувається при зміні

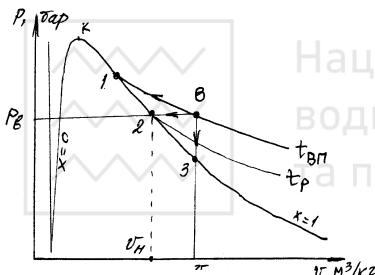


Рис.11.1. $P - v$ діаграма ефекту (точки 1,3). всіх параметрів.

11.2. Фізичні характеристики вологої пари

Абсолютна вологість – кількість водяної пари в 1 m^3 вологого повітря – $\rho_B \left[\frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right]$. Питомий об'єм визначаємо з діаграмами (рис.11.1).

При реальному охолодженні ρ_B зростає до $\rho_H = \frac{1}{v_H}$.

$$\text{Відносна вологість} - \varphi = \frac{\rho_B}{\rho_H} = \frac{P_B}{P_H}.$$



Відносна вологість вимірюється за допомогою психрометра t_p - визначається гігрометром.

В теплотехнічних розрахунках використовується вологовміст $- d \left[\frac{\tilde{a}}{\hat{e}\tilde{a}_{\tilde{N}\tilde{I}}} \right]$ - кількість вологості в грамах, що припадає на 1 кг сухого повітря.

$$d = \frac{M_B}{M_{\tilde{I}}} = \frac{P_{\hat{a}} \cdot R_{\tilde{I}}}{P_{\tilde{I}} \cdot R_{\hat{a}}} = 622 \frac{P_{\hat{a}}}{B - P_{\hat{a}}} = 622 \frac{\varphi \cdot P_H}{B - \varphi \cdot P_H} \left[\frac{\tilde{a}}{\hat{e}\tilde{a}_{\tilde{N}\tilde{I}}} \right].$$

Молекулярна маса вологого повітря

$$\mu_{\hat{A}\tilde{I}} = \sum_1^n r_i \mu_i = r_{\tilde{I}} \mu_{\tilde{I}} + r_B \mu_B = 29 - 11 \frac{P_{\hat{a}}}{\hat{A}} \left[\frac{\hat{e}\tilde{a}}{\hat{e}\tilde{i} \hat{e}\tilde{u}} \right].$$

Парціальний тиск $D_{\tilde{I}} = r_{\tilde{I}} \cdot \hat{A}$; $D_{\hat{a}} = r_{\hat{a}} \cdot \hat{A}$.

Газова стала

$$R_{\hat{A}\tilde{I}} = \frac{8314}{\mu_{\hat{A}\tilde{I}}} \left[\frac{\ddot{A}\alpha}{\hat{e}\tilde{a} \cdot \hat{e}} \right].$$

Густина вологого повітря

$$\rho_{\hat{A}\tilde{I}} = \frac{B}{R_{\tilde{I}} \cdot T_{\hat{A}\tilde{I}}} - 000132, \frac{P_{\hat{a}}}{\hat{O}_{\hat{A}\tilde{I}}} \left[\frac{\hat{e}\tilde{a}}{\tilde{i}^3} \right],$$

$$\rho_{\tilde{I}} = \frac{B}{287 \hat{O}_{\hat{A}\tilde{I}}} - \text{густина сухого повітря}.$$

Теплоємність вологого повітря

В одному кг сухого повітря знаходиться d кг перегрітої пари. Теплоємність сухого повітря (ізобарна) $Cp_{\tilde{I}} = 1 \left[\frac{\hat{e}\ddot{A}\alpha}{\hat{e}\tilde{a}_{\tilde{N}\tilde{I}} \cdot \hat{E}} \right]$.

Перегріта пара $Cp_{\hat{a}} \cong 1,96 \left[\frac{\hat{e}\ddot{A}\alpha}{\hat{e}\tilde{a} \cdot \hat{E}} \right]$, тоді теплоємність вологого повітря

$$Cp_{B\tilde{I}} = Cp_{\tilde{I}} + Cp_B \cdot d = 1 + 1,96 \cdot d \left[\frac{\hat{e}\ddot{A}\alpha}{\hat{e}\tilde{a} \cdot \hat{E}} \right].$$



Ентальпія вологого повітря

$$h_{B\bar{I}} = h_{\bar{I}} + h_{\hat{a}} \cdot d, \text{ де } h_{\bar{I}} = Cp_{\bar{I}} \cdot t_{B\bar{I}},$$

$$h_{\hat{a}} = i' + r + Cp_{\hat{a}}(t_{B\bar{I}} - t_H) = 4,19 \cdot t_H + (2500 - 2,3 \cdot t_H) + \\ + 1,96(t_{B\bar{I}} - t_H) = 2500 + 1,96 \cdot t_{B\bar{I}}.$$

$$h_{B\bar{I}} = t_{B\bar{I}} + (2500 + 1,96 \cdot h_{B\bar{I}}) \cdot d \left[\frac{\hat{e}\ddot{A}\alpha}{\hat{e}\tilde{a}} \right].$$

Тема 12. $h-d$ діаграма вологого повітря

12.1. Побудова $h-d$ діаграми

В практичних розрахунках процесів сушіння, параметрів вологої пари найчастіше використовують $h-d$ діаграму, яка побудована для барометричного тиску $B = 745$ мм рт.ст. за допомогою отриманих співвідношень (11.2). Для зручності енталпії проведено під кутом 135° . Спочатку побудовані лінії $d = \text{const}$ і $h = \text{const}$. Ізотерми визначені із рівняння енталпії. Лінії $\varphi = \text{const}$ побудовані за допомогою таблиць водяної пари, де обрані P_H при різних t . $P_{\hat{a}} = \varphi \cdot P_H$, а також $P_{\hat{a}} = \frac{B \cdot d}{622 + d}$. Починаючи з $t = 100^\circ C$ при B, d - сталих, φ - прямі лінії; $P_{\bar{I}} = \varphi \cdot B = \text{const}$.

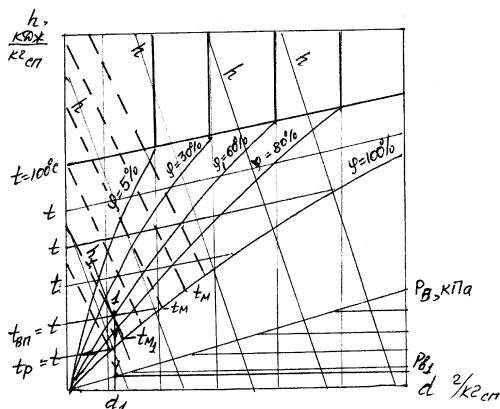


Рис.12.1. $h-d$ - діаграма



Дійсна діаграма зображена на рис. 12.3 для ділянки практичних розрахунків вологого повітря.

12.2. Визначення параметрів з $h-d$ діаграми

По заданих φ і t_{BII} знаходимо точку 1 (рис.12.1), яка характеризує стан вологої пари і знімаємо: ентальпії h_1 , вологовміст d_1 , t_p - температуру точки роси, парціальний тиск пари P_{d1} , температуру мокрого термометра t_{M1} (пунктирні ізотерми).

Розрахунок процесів: нагріву (при $d = const$), охолодження ($d = const$), випаровування ($h = const$), змішування, зволоження. Всі ці процеси відбуваються у сушарнях, у конденсаторах (рис. 12.2).

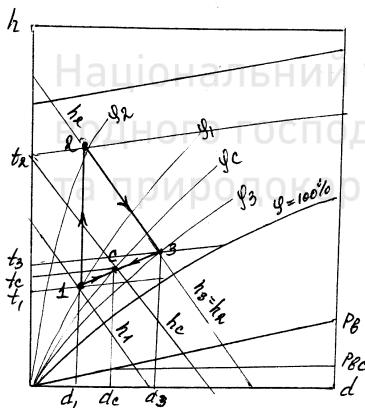


Рис.12.2

1-2 – ізобарний нагрів при $d_1 = const$ (охолодження 2-1);

2-3 – випаровування при $h = const (h_2 = h_3)$; 1-3 – процес змішування

При нагріві збільшується h . При випаровуванні (сушінні) збільшується d . Змішування проводиться по прямій 1-3 пропорційно масам M_1 і M_3 :

$$h_1 + h_3 \cdot \frac{M_3}{M_1} = \left(1 + \frac{M_3}{M_1}\right) h_c;$$



$$d_1 + d_3 \cdot \frac{M_3}{M_1} = \left(1 + \frac{M_3}{M_1}\right) d_c.$$

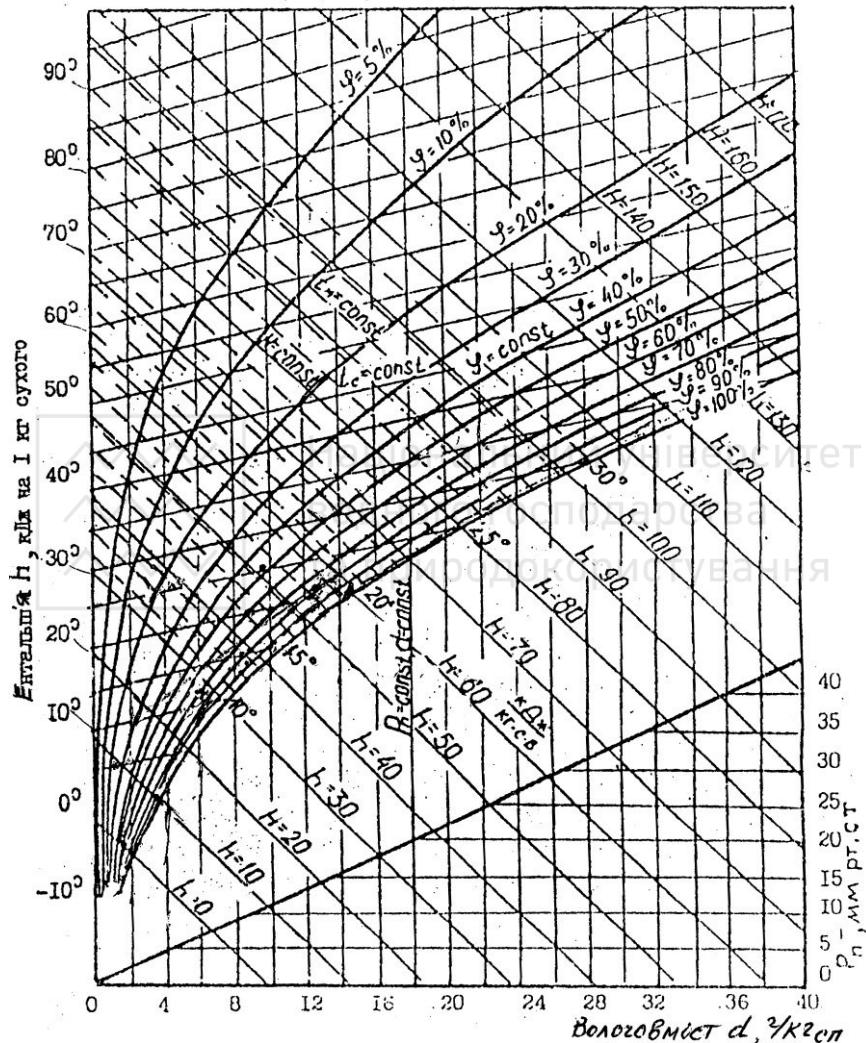


Рис. 12.3. $h-d$ діаграма вологого повітря



13.1. Поняття витікання

Витікання – прискорений рух робочого тіла вздовж профільованого каналу змінної форми за рахунок зменшення потенціальної енергії і перетворення її у кінетичну.

Профільований канал під назвою сопло може бути:

- звуженим
- розширеним
- комбінованим
(сопло Лаваля)

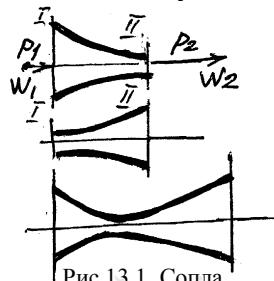


Рис.13.1. Сопла

Для перерізу $I - I$ запишемо рівняння I закону термодинаміки (2) і (3) [4-2].

$$\delta q = dh - vdP \quad (1)$$

$$\delta q = dh + wdW. \quad (2)$$

Звідки встановлюємо $wdW = -vdP$, що означає, що потенціальна енергія зменшується і перетворюється у кінетичну енергію (рис.13.2).

У дифузорі – $wdW = vdP$. Зворотне перетворення енергії - кінетична енергія перетворюється у потенціальну.

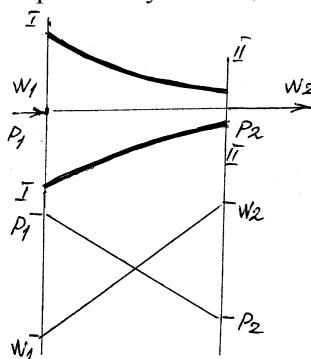


Рис. 13.2. Зміна параметрів в соплі



13.2. Наявна (технічна) робота

Наявна, або технічна робота – це робота яку може виконати потік PT на виході з сопла - l_T .

Процес витікання наближається до адіабатного процесу 1-2.

$$\begin{aligned} l_T &= \int_1^2 w dw = \int_1^2 v dP = l + P_1 v_1 = \\ &= \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) + (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \frac{k}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2) = \\ &= \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]; \end{aligned}$$

$l_T = \Delta h = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$. Національний університет
водного господарства
та природокористування

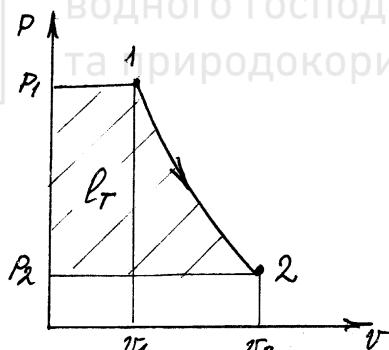


Рис.13.3. Процес розширення

Швидкість витікання визначається з формули

$$w_2 = \sqrt{2l_T} = \sqrt{2\Delta h} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Швидкість $w_1 \ll w_2$.



Витрата газу визначається з рівняння нерозривності потоку

$M_2 v_2 = f_2 w_2$ з врахуванням $Pv^k = const.$

$$M_2 = f_2 \cdot \frac{w_2}{v_2} = f_2 \cdot \frac{\sqrt{2\Delta h}}{v_2} = f_2 \cdot \frac{1}{v_2} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \\ = f_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}.$$

Визначимо, коли буде максимальна витрата M_2 .

$$\frac{\partial}{\partial P} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] = 0; \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\hat{e}\delta}^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \approx 0,5.$$

$$\text{При } k = 1,4 \quad \beta_{\hat{e}\delta} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\hat{e}\delta} = 0,528.$$

При $k = 1,3 \quad \beta_{\hat{e}\delta} = 0,546.$

Якщо підставити $\beta_{\hat{e}\delta}$ у формули для w_2 і M_2 , знайдемо

$$w_{\hat{e}\delta} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot P_1 v_1}, \not\propto \tilde{n},$$

$$M_{\hat{e}\delta} = f_{min} \cdot \left(\frac{2k}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot \frac{P_1}{v_1}}, \not\propto \tilde{n}.$$

13.3. Вибір форми сопла

Представимо рівняння: $Mv = f \cdot w$



$$Pv^k = \text{const}$$

$$wdw = -vdP$$

в диференціальному вигляді

$$\frac{dv}{v} = \frac{dw}{w} + \frac{df}{f}$$

швидкість звуку

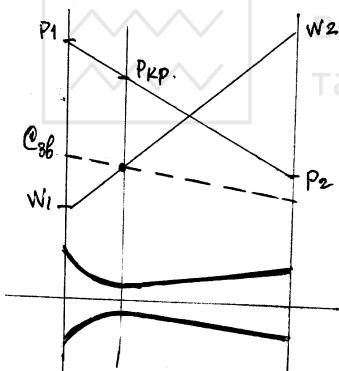
$$\frac{dv}{v} = -\frac{1}{k} \cdot \frac{dP}{P}$$

$$C_{\zeta\hat{a}} = \sqrt{kPv}$$

$$\frac{dP}{P} = -\frac{w^2}{Pv} \cdot \frac{dw}{w}.$$

Звідки отримаємо $\frac{dw}{w} \left(\frac{w^2}{C_{\zeta\hat{a}}^2} - 1 \right) = \frac{df}{f}.$

Знак dw додатній. Якщо $w > C_{\zeta\hat{a}}$, то df додатне (сопло розширене), якщо $w < C_{\zeta\hat{a}}$, то сопло звужене.



1) При $\frac{P_1}{P_{kp}} < 2$, $w_2 < C_{\zeta\hat{a}}$ сопло звужене.

2) При $\frac{P_1}{P_{kp}} = 2$, $w_2 = C_{\zeta\hat{a}}$ сопло звужене.

3) При $\frac{P_1}{P_{kp}} > 2$, $w_2 > C_{\zeta\hat{a}}$ сопло розширене.

Рис. 13.4. Вибір форми сопла

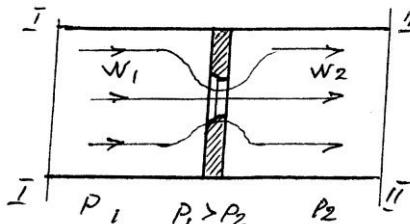
13.4. Дроселювання РТ

Дроселювання – ізоентальпійний необертьальний процес витікання через непрофільований отвір, який супроводжується зменшенням тиску.

Потенціальна енергія витрачається на подолання тертя. Питомий об'єм збільшується при розширенні РТ і на деякій відстані



швидкість $w_2 = w_1$. При цьому теплообмін відсутній і якщо початкова температура газу була менша температури інверсії, то спостерігається зменшення температури РТ.



$$\begin{aligned} h_1 &= h_2 \\ u_1 + P_1 v_1 &= u_2 + P_2 v_2 \\ \Delta u &= \Delta(Pv) \\ f_1(T) &= f_2(Pv) \end{aligned}$$

Рис. 13.5. Дроселювання

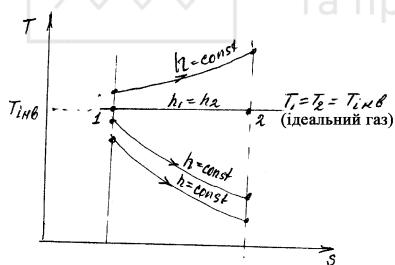
При: $-\Delta u = 0$ коли $t = t_{\text{зі} \hat{a}}$;

$$w_2 = w_1 \quad \delta q = dh + wdw \quad -\Delta u > 0$$

$$v_1 < v_2 \quad \delta q = wdw = 0 \quad t - \text{зменшується}$$

$$h_1 = h_2 \quad dh = 0 \quad -\Delta u < 0$$

$$t_1 > t_2 \quad i = \text{const} \quad t - \text{збільшується.}$$



Якщо $T_1 < T_{\text{зі} \hat{a}}$, то температура газу при дроселюванні знижується.

Дроселювання використовують:

- для зниження P ;
- для зниження T ;
- для виміру витрати робочого тіла.

Рис. 13.6. Ізоентальпії

Змістовий модуль 3. Цикли ТД

Тема 14. Другий закон термодинаміки

14.1. Формулювання другого закону термодинаміки

Поняття циклу - круговий процес, у якому РТ повертається у початковий стан. Цикл прямий здійснюється по стрілці годинника.



Оборотний цикл здійснюється без втрат енергії на тертя. Необоротний з втратами енергії.

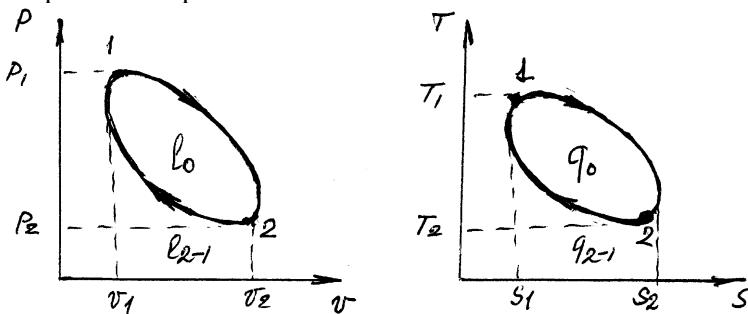


Рис.14.1. Цикл

1-2 розширення

 l_{1-2} - робота розширення (l_1);

2-1 стиск

 l_{2-1} - робота стиску (l_2);

1-2 - підвід тепла

 q_1 - підведене тепло;

2-1-відвід тепла

 q_2 - відведене теплоКорисна робота $l_0 = l_1 - l_2$ Корисне тепло $q_0 = q_1 - q_2 = \Delta u_{1-2} + l_1 - \Delta u_{2-1} - l_2 = l_0$.

$$\Delta u_{1-2} = \Delta u_{2-1}.$$

Тобто $l_0 = q_0$. У зворотному циклі $-P_0 = -q_0$.

Ефективність циклу оцінюється коефіцієнтом корисної дії. Термічний КУД – відношення корисного тепла q_0 до всього підведеного q_1 .

$$\eta_1 = \frac{q_0}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Поряд з багатьма формуллюваннями другого закону термодинаміки, наведено формулювання С. Карно, яке надає умови здійснення циклу теплового двигуна – ТД. Вони зрозумілі з попередніх пояснень про цикл:

- для здійснення цикла необхідно мати процеси розширення і стиску, а це означає, що потрібно мати «гаряче» джерело теп-



ла для підводу тепла q_1 і «холодне» джерело для відводу тепла q_2 .

- неможливо перетворити все підведене тепло в корисне q_0 без втрати тепла q_2 , тобто термічний ККД η_t завжди менше одиниці. В даному випадку $\eta_t = 1$, коли температура «холодного» джерела $T_2 = 0K$, що неможливо.

14.2. Цикл Карно

Цикл можливо скласти з різних процесів, однак найбільший ефект мають процеси ізотермічний і адіабатний. В першому все підведене тепло витрачається на здійснення роботи розширення, а в адіабатному без теплообміну можна здійснити перехід на інший температурний рівень. Саме ці процеси вибрали Карно для здійснення ідеального циклу.

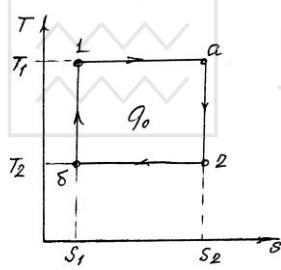


Рис.14.2. Цикл Карно

$$\text{Термічний ККД цикла Карно: } \eta_{tk} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Як бачимо, η_{tk} не залежить від фізичних характеристик РТ і в заданому інтервалі температур має максимальну корисну площину q_0 , тобто максимальний ККД. Всі інші цикли матимуть $\eta_t < \eta_{tk}$. Відношення η_t до η_{tk} визначає ступінь термодинамічної досконалості

розглядаємого циклу $\eta_{0t} = \frac{\eta_t}{\eta_{tk}}$.

На рис. 14.2 зображений прямий цикл Карно, який складається з процесів розширення:

- 1-а – ізотерма ($q_1 = l$);
- а-2 – адіабата ($q = 0$).

І процесів стиску:

- 2-б – ізотерма ($q_2 = l_2$);
- б-1 – адіабата ($q = 0$).



Зворотній цикл Карно буде мати від'ємне q_0 і використовується для порівняння з циклами холодильних машин. Холодильний коефіцієнт зворотного циклу Карно має вигляд:

$$\varepsilon_k = \frac{q_2}{q_0} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Регенеративний цикл

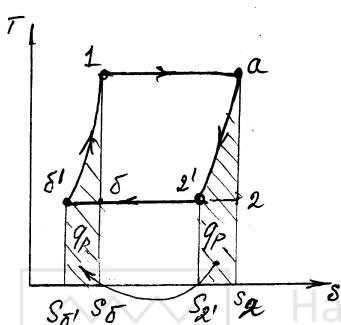


Рис. 14.3. Регенеративний цикл

Якщо у циклі Карно дві адіабати замінити на дві паралельні політропи, то отримуємо цикл, що буде мати термічний ККД $\eta_{tp} = \eta_{tk}$, бо корисні площини однакові (рис.14.3).

Такий цикл має назву регенеративний. У процесі політропного розширення $a - 2'$ відводиться тепло q_p - регенерації і підводиться до РТ у політропному стиску $\delta' - 1$.

14.3. Математичний вираз другого закону термодинаміки

Порівняно ідеальний і реальний цикли з циклом Карно

Ідеальний цикл

$$\eta_t = \eta_{tk}$$

$$1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \text{ тобто зведене}$$

$$\text{Тепло } \frac{q_2}{T_2} = \frac{q_1}{T_1}; s_2 = s_1$$

$$\Delta s = 0$$

Реальний цикл

$$\eta_t < \eta_{tk}$$

$$1 - \frac{q_2}{q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1} \text{ тобто зведене}$$

$$\text{тепло } \frac{q_2}{T_2} > \frac{q_1}{T_1}; s_2 > s_1$$

$$\Delta s > 0.$$

$\Delta s \geq 0 (ds \geq 0)$ - для ідеальних циклів ентропія робочого тіла не змінюється, тоді як для реальних циклів ентропія зростає (працездатність РТ зменшується). Об'єднані перший і другий закони термодинаміки мають вираз $Tds \geq du + \delta l$.



21.1. Принципова схема ПСУ

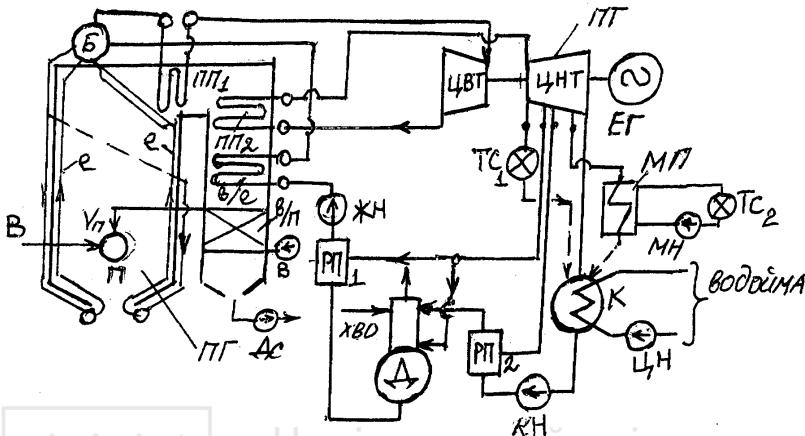
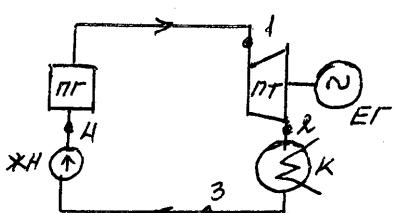


Рис. 21.1. Принципова схема ПСУ

ПГ – парогенератор; ПТ – парова турбіна; К – конденсатор; ЕГ – електрогенератор;
 ЦВТ, ЦНТ – циліндри високого і низького тиску; МП – мережевий підігрівач;
 МН – мережевий насос; ТС₁, ТС₂ – технологічний і тепловий споживачі;
 ЦН – циркуляційний насос; РП₁, РП₂ – регенеративні підігрівачі високого і
 низького тиску; КН – конденсатний насос; Д – деаератор; ЖН – живильний насос;
 В – вентилятор повітря; в/п – повітря підігрівач; в/е – водяний економайзер; ПП₁,
 ПП₂ – пароперегрівачі первинний і вторинний; е – екран; П – пальник; Б – барабан
 котла; В – подача палива, кг/с; $V_{\text{п}}$ – подача повітря, m^3/s ; ДС – димосмок;
 ХВО - хімводоочищення

21.2. Цикл ПСУ (цикл Ренкіна)

Процеси:



- 1-2 – адіабатний процес розширення пари в турбіні;
- 2-3 – конденсація в К;
- 3-4 – ізохорний стиск в ЖН;
- 4-1 – ізобарний процес перетворення води в перегріту пару в ПГ.

Рис. 21.2. Цикл Ренкіна

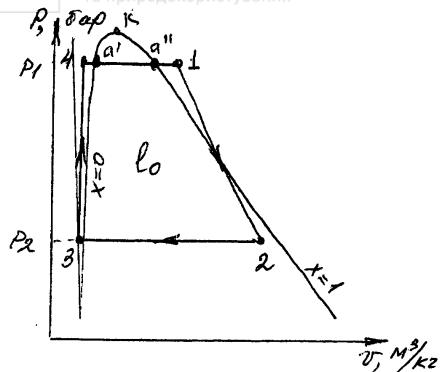


Рис. 21.3. PV - діаграма цикла ПСУ



Рис. 21.4. $T-S$ діаграма цикла ПСУ

- $4-a'$ – нагрів живильної води від $t_{\text{жс}}$ до t_H при $P_1 = \text{const}$, у водяному економайзері котла;
- $a'-a''$ – ізобарно-ізотермічний процес пароутворення в екранах котла;
- $a''-a$ – ізобарний процес перегріву в ПП₁.

- 2-3 – ізобарно-ізотермічний процес конденсації (протилежний процесу пароутворення $a'-a''$);
- 3-4 – ізохорний процес стиску живильної води у насосі ЖН. Вода мало стислива рідина і в $T-S$ діаграмі процес 3-4 зображається точкою, оскільки всі ізобари практично зливаються з нижньої пограничної кривої $x = 0$.

- $q_{\text{жс}}$ – тепло живильної води з яким вона подається в ПГ.

$$q_{\text{жс}} = C_{P\text{в}} \cdot t_{\text{жс}} = 4,19 \cdot t_{\text{жс}} (\text{пл.} 0 - a_0 - 3 - S_3) = h_{\text{жс}}, \frac{\kappa \Delta \text{жс}}{k_2}.$$

- $q_{\text{в/e}}$ – тепло підведене у водяному економайзері ($\text{пл.} S_3 - 4 - a' - S'$)

$$\begin{aligned} q_{\text{в/e}} &= h' - h_{\text{жс}} \approx C_{P\text{в}} \cdot t_H - C_{P\text{в}} \cdot t_{\text{жс}} = \\ &= 4,19(t_H - t_{\text{жс}}), \frac{\kappa \Delta \text{жс}}{k_2}. \end{aligned}$$



- теплота пароутворення ($n\lambda(a' - a'' - S'' - S')$)

$$r = h'' - h', \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho} \cdot h''(n\lambda(a'' - S'' - 0 - a_0 - a' - a'')).$$

$$h'(n\lambda(a' - S' - 0 - a_0 - a')).$$

$$h_{\text{жв}}(n\lambda(0 - a_0 - 3 - S_3 - 0)).$$

- q_{nep} - тепло перегріву ($n\lambda(1 - S_1 - S'' - a'' - 1)$)

$$q_{nep} = h - h'', \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho}, \text{де}$$

h - ентальпія перегрітої пари у точці 1.

$$(n\lambda(1 - S_1 - 0 - a_0 - a' - a'' - 1)).$$

$$h = h_{\text{жв}} + q_{\text{в/е}} + r + q_{nep}, \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho}.$$

- Ентальпія вологої пари у точці 1
 $a_x(n\lambda(a_x - S_x - 0 - a_0 - a' - a_x)).$

$$h_x = h_{\text{жв}} + q_{\text{в/е}} + r_x, \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho}.$$

- Тепло, підведене у парогенераторі ПГ
 $(n\lambda(1 - S_1 - S_3 - 4a' - a'' - 1)). q_1 = h - h_{\text{жв}}, \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho}.$

- Тепло відведене в конденсаторі К ($n\lambda(2 - S_1 - S_3 - 3 - 2)$),

$$q_2 = h_2 - h_{\text{жв}}, \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho}. h_2 - \text{ентальпія у точці 2} \\ (n\lambda(2 - S_1 - 0 - a_0 - 4 - 2)).$$

- Корисне тепло ПСУ $q_0 = q_1 - q_2$ ($n\lambda(1 - 2 - 4 - a' - a'' - 1)$).

$$q_0 = h_1 - h_2, \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varrho}.$$

21.3. Дійсний процес розширення пари у турбіні

Параметри перегрітої пари перед турбіною звичайно задана: P_1, t_1 , а також тиск відробленої пари після турбіни P_2 , що дає

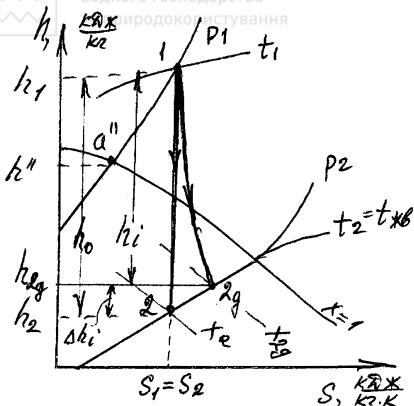


Рис. 21.5. $h - S$ діаграма

розширення здійснюється по політропі $1 - 2 \ddot{\alpha}$. Корисний теплоперепад h_0 зменшується на величину втрат $\Delta h_i = h_0 - h_i$, де h_i - дійсний теплоперепад, $\frac{\kappa_{Дж}}{кг}$. Відношення h_i до h_0 - внутрішній відносний ККД

$$\eta_{0i} = \frac{h_i}{h_0},$$

який характеризує втрати на тертя у проточної частини турбіни.

З $h - S$ діаграмами легко визначається термічний ККД

$$\eta_t = \frac{q_0}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{жс}}, \text{ де } h_{жс} = 4,19 \cdot t_{жс}.$$

$t_{жс} = t_2$ - температура насыщення при P_2 .

Підвищити η_t можливо, якщо збільшити P_1, t_1 , або зменшити P_2 . Сьогодні значення P_1 до 200 бар, t_1 до 700°C , виходячи з умов міцності металу, $P_2 = 0,01 \div 0,02$ бар – таке розрідження у конденсаторі створюється охолоджувальною водою з водойма, температура якої $t_{охл} \approx 5 \div 20^{\circ}\text{C}$ і вона визначає вакуум в конденсаторі.

можливість легко побудувати теоретичний процес розширення – адіабатний в $h - s$ - діаграмі 1-2.

$h_0 = q_0 = h_1 - h_2$ - корисний теплоперепад, $\frac{\kappa_{Дж}}{кг}$.

В наслідок наявності втрат енергії на подолання тертя в проточної частині турбіни, тепло тертя збільшує ентальпії за турбінної h_2 і процес

1-2 є.

Національний університет
водного господарства
та природокористування



Тема 22. Енергобаланс цикла ПСУ

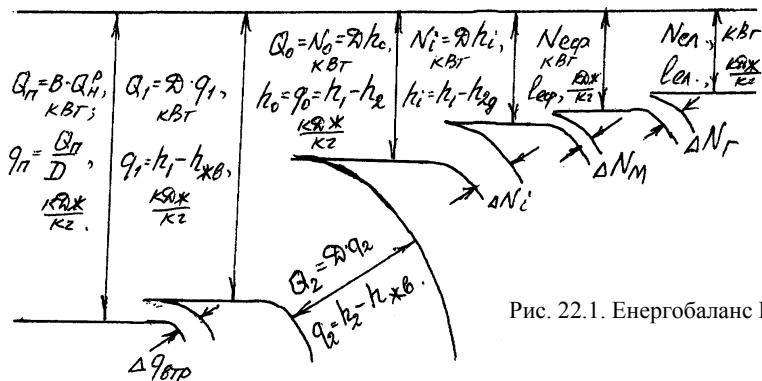


Рис. 22.1. Енергобаланс ПСУ

22.1. Втрати енергії у ПСУ і потужності

- $\Delta q_{втр}$ парогенератора $= q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$,
- де - q_2 - втрати тепла з відхідними димовими газами, залежить від температури відхідних газів;
- q_3 - втрата тепла від хімічного недопалювання;
 - q_4 - втрата тепла від механічного недопалювання твердого палива;
 - q_5 - втрата тепла від випромінювання корпусу ПГ в навколошнє середовище;
 - q_6 - втрата тепла зі шлаком при спалюванні твердого палива.

В залежності від виду палива, способу спалювання

$$\Delta q_{втр} = 2 \div 15\% \text{ від } q_{П} = 0,02 \div 0,15 q_{П},$$

$$Q_{втр} = \Delta q_{втр} \cdot q_{П} \cdot D, \text{ кВт. } Q_{П} = Q_1 + Q_{втр}, \text{ кВт.}$$

- Q_2 - основна втрата тепла з охолоджувальною водою

$$Q_2 = D(h_2 - h_{жв}), \text{ кВт. } Q_1 = Q_0 + Q_2, \text{ кВт; } Q_2 \approx 0,5 \cdot Q_1.$$

- Q_1 - підведене тепло до водяної пари в ПГ, кВт.

$$Q_1 = D(h_1 - h_{жв}), \text{ кВт.}$$

- Q_0 - корисне тепло, яке передається турбіні



$$Q_0 = D(h_l - h_0) = N_0, \text{ кВт.}$$

N_0 - теоретична потужність турбіни, якщо все тепло Q_0 перетворене в N_0 .

- N_i - внутрішня потужність турбіни

$$N_i = N_0 - \Delta N_i, \text{ кВт. } \Delta N_i = D\Delta h_i, \text{ кВт.}$$

$$\Delta N_i = D\Delta h_i = D(h_i - h_{2g}).$$

- $N_{e\phi}$ - ефективна потужність на валу турбіни

$$N_{e\phi} = N_i - \Delta N_M.$$

- ΔN_i - внутрішні втрати енергії на подолання тертя у проточній частині турбіни.

- ΔN_M - механічні втрати енергії на подолання тертя у підшипниках турбіни.

- ΔN_G - втрати енергії у генераторі.

$$N_{el} = N_{e\phi} - \Delta N_G - \text{електрична потужність, яка звімается з шин електрогенератора.}$$

22.2. ККД ПСУ

- η_{PG} - ККД парогенератора $= \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D(h_l - h_{жe})}{BQ_h^p} \cdot 100\%$.

(прямий баланс ПГ).

$$\eta_{PG} = 1 - \Delta q_{энp} \% - \text{зворотній баланс ПГ.}$$

- η_t - термічний ККД ПСУ $= \frac{Q_0}{Q_1} = \frac{q_0(h_0)}{q_1} = \frac{h_l - h_2}{h_l - h_{жe}}$;

(характеризує втрати q_2).

- η_{0i} - внутрішній відносний ККД турбіни

$$\eta_{0i} = \frac{N_i}{N_0} = \frac{h_i}{h_0} = \frac{h_l - h_{2g}}{h_l - h_2},$$

(характеризує внутрішні втрати турбіни).

- η_M - механічний ККД турбіни.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

$\eta_M = \frac{N_{e\phi}}{N_i} = \frac{l_{e\phi}}{h_i}$ - характеризує втрати у підшипниках.

- η_G - ККД генератору, $\eta_G = \frac{N_{el}}{N_{e\phi}}$ і характеризує втрати в генераторі.

Відносні ККД:

- $\eta_{0i} = \frac{N_i}{N_0}$ - відносний внутрішній;
- $\eta_{0e\phi} = \frac{N_{e\phi}}{N_0}$ - відносний ефективний;
- $\eta_{0el} = \frac{N_{el}}{N_0}$ - відносний електричний.

- Абсолютні ККД:
 - $\eta_i = h_t \cdot h_{0i}$ - абсолютний внутрішній;
 - $\eta_{e\phi} = h_t \cdot h_{0e\phi}$ - абсолютний ефективний;
 - $\eta_{el} = h_t \cdot h_{0el}$ - абсолютний електричний.
- ККД ПСУ

$$\eta_{PSU} = \eta_{PG} \cdot \eta_t \cdot \eta_{0i} \cdot \eta_M \cdot \eta_G \cdot \eta_{PP} = \eta_{PG} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{PP} = \frac{N_{el}}{Q_{PP}};$$

- η_{PP} - ККД паропроводу (0,99 – приймається).

Визначення потужностей:

- $N_0 = \Delta h_0$;
- $N_i = \Delta h_i = \Delta h_0 \cdot \eta_{0i}$;
- $N_{e\phi} = \Delta h_0 \cdot \eta_{0i} \cdot \eta_M = \Delta h_0 \cdot \eta_{0e\phi}$;
- $N_{el} = \Delta h_0 \cdot \eta_{0i} \cdot \eta_M \cdot \eta_G = \Delta h_0 \cdot \eta_{0el}$.

Теоретична питома вага пари на вироблення 1 кВт²

$$d_0 = \frac{D}{M_0} = \frac{D}{\Delta h_0} = \frac{1}{h_0} \frac{\kappa g \cdot \varrho \delta}{\kappa \Delta \varrho \cdot \varrho \delta} = \frac{3600}{h_0} \left[\frac{\kappa g}{\kappa B m^2} \right].$$

Теоретична питома витрата тепла на вироблення 1 кВт².



$$q_0 = d_0 \cdot q_1 = d_0 (h_l - h_{\text{жв}}), \left[\frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa B m^2} \right].$$

Дійсна питома витрата пари

$$d = \frac{D}{N_{el}} = \frac{3600}{h_0 \cdot \eta_{0el}}, \frac{\kappa \varepsilon}{\kappa B m^2}.$$

Дійсна питома витрата тепла

$$q = d(h_l - h_{\text{жв}}), \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa B m^2}.$$

Питома витрата умовного палива

$$Q_m^p = 29300 \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa B m^2} - \text{теплота згорання умовного палива.}$$

$$b_y = \frac{B_y}{N_{el}} = \frac{B_y}{B Q_m^p \cdot \eta_{PSU}} = \frac{0,123}{\eta_{PSU}}, \frac{\kappa \varepsilon}{\kappa B m^2}.$$

$$N_{el} = Q_P \cdot \eta_{PSU} = B Q_m^p \cdot \eta_{PSU}.$$

22.3. Цикл ПСУ на насиченої пари

Представимо цикл ПСУ на насиченої пари в термодинамічних діаграмах. ПГ видає суху насичену пару – СНП. Відсутній процес перегріву пари.

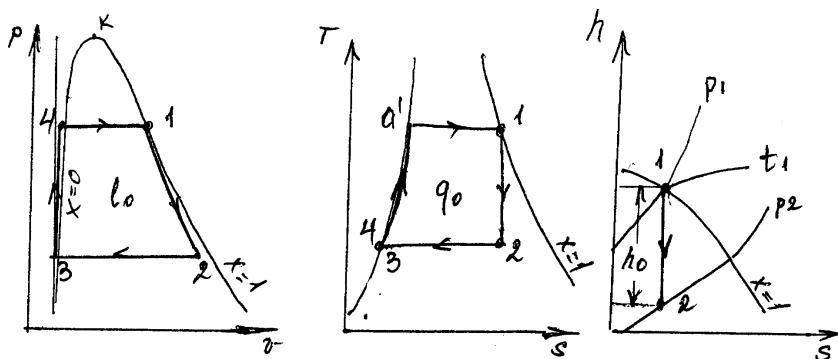


Рис. 22.2. Діаграми цикла



23.1. Вторинний перегрів пари

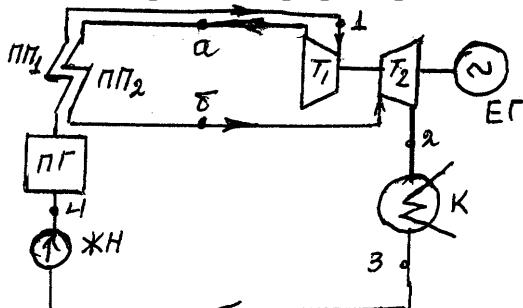


Рис. 23.1. Схема ПСУ

Процеси:

а-б – вторинний перегрів пари.

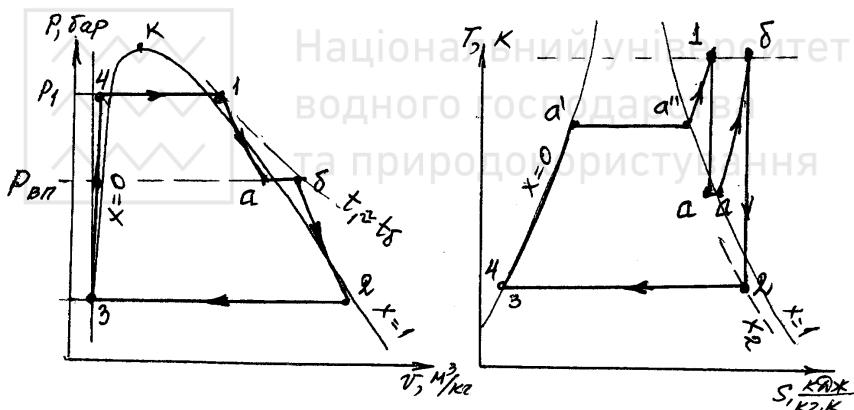
 $P_{B\Pi}$ – тиск вторинного перегріву. $\Pi\Pi_{1,2}$ – первинний і вторинний пароперегрівачі.

Рис. 23.2. Цикл ПСУ

1 – а – адіабатне розширення у першому циліндрі турбіни до точки а де x_2 не менше допустимого значення $x_{2\text{don}} \approx 0,98$. В цій точці обирається тиск вторинного перегріву $P_{B\Pi}$. Вторинний перегрів здійснюється до $t_{B\Pi} \approx t_1$. Знаходимо точку б, з якої відбувається адіабатний процес розширення у другому циліндрі турбіни – б – 2. В точці 2 маємо $x_2 \geq x_{2\text{don}}$. Якщо відсутній вторинний перегрів адіабатне розширення відбувається до точки 2', де маємо недопустиме x_2' . Тому вводимо вторинний перегрів пари.



Зі зменшенням x_2 збільшується вологість $(1 - x_2)$, що веде до збільшення тертя, втрат енергії на подолання тертя і зменшення ККД – η_{0i} .

- Тепло, яке витрачається на первинний перегрів у III_1

$$q_{III_1} = h_l - h'', \frac{\kappa \Delta c}{\kappa g}.$$

- Тепло, яке витрачається на вторинний перегрів у III_2 .

$$q_{III_2} = h_{\bar{o}} - h_a, \frac{\kappa \Delta c}{\kappa g}.$$

- Термічний ККД циклу ПСУ зі вторинним перегрівом

$$\eta_t^{BP} = \frac{q_0}{q_{n\partial v}} = \frac{h'_0 + h''_0}{q_1 + q_{BP}} = \frac{(h_l - h_a) + (h_{\bar{o}} - h_2)}{(h_l - h_{\text{жв}}) + (h_{\bar{o}} - h_a)}.$$

- Підведене тепло до пари в ПГ $q_{n\partial v} = q_1 + q_{BP}$,

де $q_1 = h_l - h_{\text{жв}}$

$q_{BP} = h_{\bar{o}} - h_a$ - тепло вторинного перегріву.

23.2. Комбіноване вироблення електричної і теплової енергії. Цикл ТЕЦ

Основна втрата тепла в конденсаторі $q_2 \approx 0,5q_1$. Це тепло можна використати для потреб теплофікації: на опалення, вентиляцію і гаряче водопостачання. Однак, це низькопотенціальне тепло, з низькою температурою t_2 (температура насыщення при P_2). Тому для нагріву мереженої води до стандартного значення $150^\circ C$ потрібно збільшувати тиск за турбіною P_2 до значень температури при якій можливо нагріти мережеву воду до потрібної величини. А це веде до зниження термічного ККД і зменшенню вироблення електроенергії, але при цьому виробляється теплова енергія і загальний коефіцієнт використання тепла палива зростає

$$K = \frac{N_{el} + Q_{TE}}{Q_{II}} \text{ до } 70\%.$$



Така ТЕЦ потребує використання протитискових турбін (P_2 більше атмосферного) типу P - теплофікаційна протитискова турбіна.

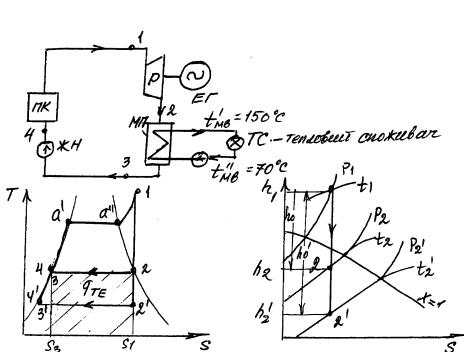


Рис. 23.4. Цикл ТЕЦ з турбінної P

При збільшенні P'_2 до P_2 , збільшується ентальпія від h'_2 до h_2 і зменшується тепло перепад від h'_0 до h_0 , зменшується η_t, N_{el} . Тепло, яке може бути використане для теплофікації $q_{TE} \left[\frac{кДж}{кг} \right]$ -

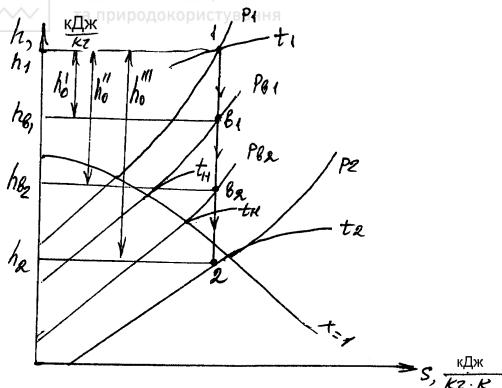
площа $2 - S_1 - S_3 - 4 - 2$. Загальне тепло, яке передаємо мереженій воді: $Q_{TE} = \Delta q_{TE} \eta_{MP} = M_{MB} (h'_{MB} - h''_{MB})$ ККД МП береться з його характеристики, або приймається $\eta_{MP} \approx 0,98$.

Основним недоліком ТЕЦ з турбінами типу P є пов'язане вироблення електричної і теплової енергій. Найчастіше використовують турбіни з теплофікаційними і промисловими відборами пари типу T , або типу TP представлена на рис. 21.1.

$$Q_{TE} = M_{MB} (h'_{MB} - h''_{MB}), \text{ кВт.}$$

M_{MB} - витрата мережової води;

h_{MB} - ентальпія мережової води $h_{MB} = 4,19 \cdot t_{MB}$.



P_{σ_1} - тиск пари промислового відбору;
 P_{σ_2} - тиск пари теплофікаційного відбору. Відповідні енталпії відборів h_{σ_1} і h_{σ_2} .

Рис. 23.5. Цикл ТЕЦ з турбіною $T\bar{P}$

Тепло промислового відбору $Q_{\Pi} = \Delta\sigma_1(h_{\sigma_1} - h'_{\sigma_1})$, кВт.

Тепло теплофікаційного відбору $Q_T = \Delta\sigma_2(h_{\sigma_2} - h'_{\sigma_2})$, кВт.

Енталпії $h_{\sigma_1}, h_{\sigma_2}$ - обираємо з $h-S$ діаграми у відповідних точках, а енталпії $h'_{\sigma_1}, h'_{\sigma_2}$ знаходимо по температурах насичення t_H , які відповідають тиску відбору.

$$h'_{\sigma_1} = 4,19t_H \text{ (при } P_{\sigma_1}).$$

$$h'_{\sigma_2} = 4,19t_H \text{ (при } P_{\sigma_2}).$$

$\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$ - кількість пари у відповідних відборах.

Термічний ККД

$$\eta_t = \frac{q_0}{q_1} = \frac{\Delta\sigma_1 \cdot h'_0 + \Delta\sigma_2 \cdot h''_0 + \Delta_K \cdot h'''_0}{q_1}; \text{ де}$$

- \mathcal{D} - витрата пари на турбіну, кг/с

$$\mathcal{D} = \Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta_K, \text{ кг/с};$$

- $\Delta\sigma_1$ - кількість пари промислового відбору, кг/с;

- $\Delta\sigma_2$ - кількість пари теплофікаційного відбору, кг/с;

- Δ_K - кількість пари, яка надійшла в конденсатор.

Теплоперепади (корисні):

$$h'_0 = h_1 - h_{\sigma_1}; h''_0 = h_1 - h_{\sigma_2}; h'''_0 = h_1 - h_2, \frac{\kappa \mathcal{D} \mathcal{K}}{\kappa \mathcal{G}}.$$



Недовироблення електроенергії внаслідок промислового і теплофікаційного відборів відбувається за рахунок зменшення загального корисного теплоперепаду.

$h_{0g} = h_0 - \alpha_{\text{el}}(h_{\text{el}} - h_2) - \alpha_{\text{t}}(h_{\text{t}} - h_2)$ - залишковий корисний теплоперепад (дійсний), який витрачається на вироблення електроенергії. Кількість тепла, яке витрачено на теплофікацію $Q_{TE} = Q_P + Q_T = D_P \cdot \Delta h_P + D_T \cdot \Delta h_T$, кВт.

Коефіцієнт використання тепла палива

$$K = \frac{N_{\text{el}} + Q_{TE}}{Q_P} \cdot 100\%.$$

Тема 24. Регенеративний цикл ПСУ

Регенерація полягає в тому, що використовується частина тепла q_2 для підігріву живильної води перед ПГ. Це реалізується шляхом відбору частини пари з кінцевих ступенів турбіни і подачі її в регенеративні підігрівачі – РП де нагрівається живильна вода перед ПГ. РП по конструкції бувають поверхневого і змішуючого типу, в залежності від схеми підключення – низького тиску, які встановлюються після конденсатору до деаератору і високого тиску, які підключені після Д до ПГ. В змішуючи РП пара відбору змішується з живильною водою, а в поверхневих пара відбору віddaє тепло живильній воді через розділюючи стінку. Пара відбору конденсується від h'_e до h''_e , а живильна вода нагрівається до h''_e з

нагрівом на $3 \div 5^\circ C$. Конденсат відбору зливається в попередній РП само течею, або примусово дренажним насосом. В наслідок регенерації зменшується втрата тепла q_2 . При нагріві живильної води у ПГ потрібно менше тепла (палива), що збільшує η_t . Чим більша кількість РП, тим більше η_t . Однак практично встановлюється оптимальна кількість РП – 5÷7, яка обирається шляхом техніко-економічного розрахунку з порівнянням кошторису РП і економією витрати палива від збільшення η_t .

Теоретичний цикл з безмежною кількістю РП має назву цикл з граничною регенерацією. На рис. 24.1,а зображена схема циклу ПСУ з граничною регенерацією для намоченої пари, для якого $\eta_{t_K} = \eta_{t_P}$,



так як адіабати замінюються двома паралельними політропами $4 - a'$ і $1 - 2$ і корисне тепло q_0 однакове.

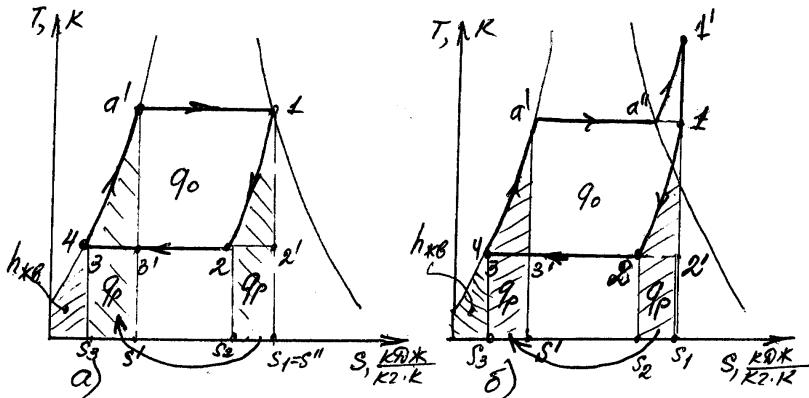


Рис. 24.1. Цикл ПСУ з граничною регенерацією:

а) – для насыченої пари;

б) – для перегрітої пари

Процес $1 - 2$ – регенеративний процес нагріву живильної води в РП. Максимальна кількість тепла, яка може бути відведена на регенерацію $q_p = h' - h_{жв}$.

Для циклу на перегрітої пари регенерація може початись тільки з точки 1. Підведене тепло в ПГ $q_1 = h_{l'} - h'$, відведене $q_2 = h_2 - h_{3'} = h_2 - h_{жв} = T_H(S_1 - S')$.

Теоретичний ККД з граничною регенерацією для циклу на перегрітої пари $\eta_{t_p} < \eta_{t_k}$

$$\eta_{t_p} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{h_2 - h_{жв}}{h_{l'} - h'} = 1 - \frac{T_H(S_1 - S')}{h_{l'} - h'};$$

T_H – температура насыщення при P_2 .

24.1. Схеми ПСУ з регенеративними підігрівачами

Розглянемо схему з одним змішуючим РП і процеси в $T - S$ і $h - S$ діаграмах.

Точка відбору пари – ϖ , h_ϖ – ентальпія відбору, h_K – ентальпія конденсату після K . h'_ϖ – ентальпія нагріву живильної води,



$$\mathcal{D} = \mathcal{D}_e + \mathcal{D}_k - \text{матеріальний баланс ПСУ. } 1 = \frac{\mathcal{D}_e}{\mathcal{D}} + \frac{\mathcal{D}_k}{\mathcal{D}};$$

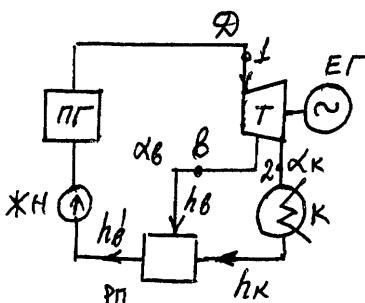


Рис. 24.2. Цикл ПСУ з РП

$1 = \alpha_e + \alpha_k$ - матеріальний баланс в

частках: $\alpha_i = \frac{\mathcal{D}_{e_i}}{\mathcal{D}}$ - частка відбору.

Тепловий баланс

$$\alpha_e(h_e - h'_e) = (1 - \alpha_e)(h'_e - h_k),$$

$$\text{звідки } \alpha_e = \frac{h'_e - h_k}{h_e - h_k}.$$

Термічний ККД

$$\eta_t = \frac{h_0}{q_1} = \frac{\alpha_e(h_1 - h_e) + (1 - \alpha_e)(h_1 - h_2)}{h_1 - h'_e}.$$

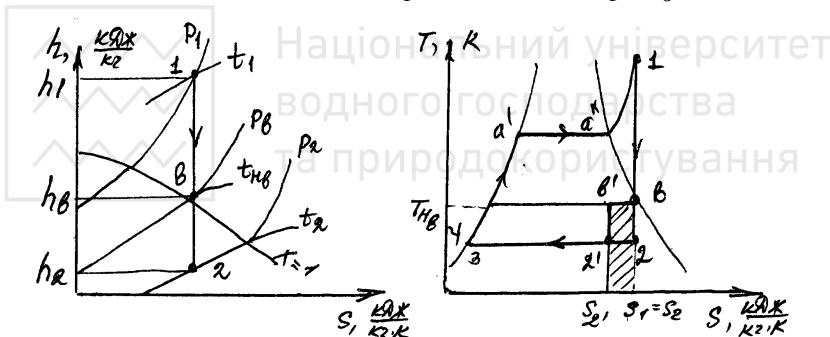


Рис. 24.3. Діаграми цикла ПСУ з РП

$$h'_e = 4,19 \cdot t_{H6}, \frac{\kappa \Delta \text{жс}}{\kappa \varepsilon};$$

$$h_k = 4,19 \cdot t_2, \frac{\kappa \Delta \text{жс}}{\kappa \varepsilon}.$$

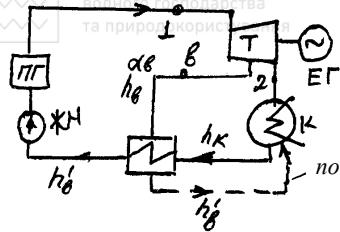
$\varepsilon - \varepsilon'$ - ізобарний процес відбору тепла в РП від пари відбору

$$q_p = \alpha_e T_{H6} (S_1 - S_{2'}), \frac{\kappa \Delta \text{жс}}{\kappa \varepsilon} \text{ (пл. } S_1 - \varepsilon - \varepsilon' - S_{2'}).$$

Розглянемо схему ПСУ з одним поверхневим РП.

Тепловий баланс

$$\alpha_e(h_e - h'_e) = (1 - \alpha_e)(h'_e - h_k),$$



$$\alpha_B = \frac{h'_e - h_k}{h_e - h_k}.$$

повернення конденсату відбору в К з енталпією h'_e

Рис. 24.4. Цикл ПСУ з РП

Схема з двома змішуючими РП і деаератором Д.

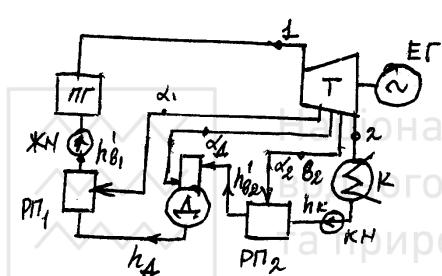


Рис. 24.5. Схема цикла

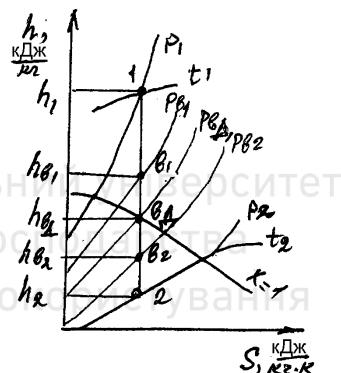


Рис. 24.6. $h - S$ - діаграма

- Тепловий баланс і $P\pi_1$

$$\alpha_1(h_{e_1} - h'_{e_1}) = (1 - \alpha_1)(h'_{e_1} - h_D).$$

- Тепловий баланс деаератору Д (змішуючого типу)

$$\alpha_D(h_{e_D} - h_D) = (1 - \alpha_1 - \alpha_D)(h_D - h'_{e_2}).$$

- Тепловий баланс $P\pi_2$

$$\alpha_2(h_{e_2} - h'_{e_2}) = (1 - \alpha_1 - \alpha_D - \alpha_2)(h'_{e_2} - h_k).$$

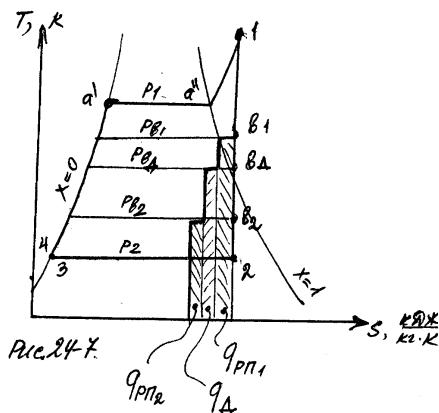


Рис. 24.7. $T - S$ - діаграма

Термічний ККД

$$\eta_t = \frac{\alpha_1(h_1 - h_{\delta_1}) + \alpha_D(h_1 - h_{\delta_D}) + \alpha_2(h_1 - h_{\delta_2}) + \alpha_K(h_1 - h_2)}{h_1 - h'_{\delta_1}}.$$

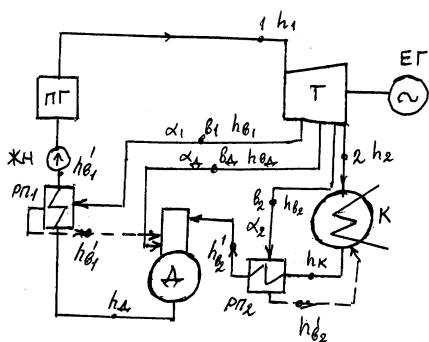


Рис.24.8. Схема цикла

Пара в кількості α_1 розширюється від h_1 до h_{δ_1} .

Пара в кількості α_D розширюється від h_1 до h_{δ_D} .

Пара в кількості α_2 розширюється від h_1 до h_{δ_2} .

$\alpha_{\text{конденсатору}} = 1 - \alpha_1 - \alpha_D - \alpha_2$ розширюється від h_1 до h_2 .

Схема з двома поверхневими РП і Д.

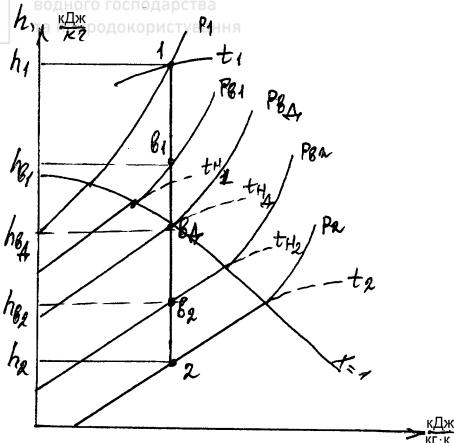
- α_1 - частка відбору на $P\bar{P}_1$;

- α_D - частка відбору на D ;

- α_2 - частка відбору на $P\bar{P}_2$;

- α_K - частка пари в конденсаторі.

$$\alpha_K = 1 - \alpha_1 - \alpha_D - \alpha_2.$$



Ентальпії конденсату:

- після $P\pi_1$

$$h'_{e_1} = 4,19 \cdot t_{H_1};$$

- після деаератору

$$h_D = 4,19 \cdot t_{H_D};$$

- після $P\pi_2$

$$h'_{e_2} = 4,19 \cdot t_{H_2};$$

- після конденсатору

$$h_k = 4,19 \cdot t_2.$$

Рис. 24.9. $h - S$ - діаграма

Теплові баланси:

$$- P\pi_1 \quad \alpha_1(h_{e_1} - h'_{e_1}) = 1 \cdot (h'_{e_1} - h_D);$$

$$- D \quad \alpha_1 \cdot h'_{e_1} + \alpha_D \cdot h_{e_D} + (1 - \alpha_1 - \alpha_D)h'_{e_2} = 1 \cdot h_D \$$$

$$- P\pi_2 \quad \alpha_2(h_{e_2} - h'_{e_2}) = (1 - \alpha_1 - \alpha_D)(h'_{e_2} - h_k).$$

Термічний ККД

$$\eta_t = \frac{\alpha_1(h_1 - h'_{e_1}) + \alpha_D(h_1 - h_{e_D}) + \alpha_2(h_1 - h'_{e_2}) + (1 - \alpha_1 - \alpha_D - \alpha_2)(h_1 - h_2)}{h_1 - h'_{e_1}}$$

24.2. Ексергетичний метод дослідження ефективності циклів ТД

Для дослідження ефективності циклів ТД традиційно використовується метод ККД (ентропійний), розгляд якого зроблений для кожного ТД.

Існує також ексергетичний метод дослідження циклів ТД. Для цього згадаємо поняття вільної енталпії $\psi = h - TS$ - та частина повної енергії, яку можна використати. Якщо обрати ідеальні процеси (оборотні) для переходу від заданих параметрів до параметрів навколошнього середовища, то можна отримати



максимально можливу корисну роботу. Такими процесами є адіабата і ізотерма.

Ексергія робочого тіла – максимальна корисна робота, яку може виконати PT при розширенні від початкових параметрів P_1, T_1 до параметрів навколошнього середовища P_0, T_0 оборотними процесами – адіабатним і ізотермічним.

$$e_{PT} = (h_1 - h_0) - T_0(S_1 - S_0), \frac{\kappa \Delta \text{ж}}{\kappa \varepsilon}.$$

$$e_1 = h_1 - T_0 \cdot S_1; e_0 = h_0 - T_0 \cdot S_0; T \cdot S - \text{втрати енергії}.$$

e_{PT} - ексергія робочого тіла.

e_1 - ексергія PT у початковому стані.

e_2 - ексергія PT у при параметрах навкілля.

$e_1 - e_2$ - корисна частина максимальної роботи.



Рис. 24.10. Графічне зображення e_{PT}

Ексергія тепла – e_q максимально корисне тепло, визначається за допомогою ККД циклу Карно.

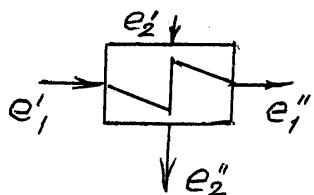
$$\eta_{tk} = \frac{q_0}{q_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1}; q_0 = \eta_{tk} \cdot q_1.$$

Таким чином, $e_q = \eta_{tk} \cdot Q_1 = \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \cdot Q_1$.



Ексергетичні баланси

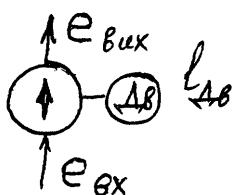
- ТА - теплообмінний апарат



$$(e'_1 - e''_1) \cdot \eta_e = e''_2 - e'_2;$$

$$\eta_e = \frac{e''_2 - e'_2}{e''_1 - e''_2} \text{ - ексергетичний ККД.}$$

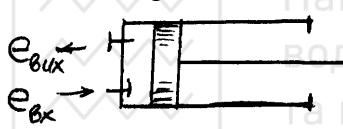
- ЖН - живильний насос



$$e_{aux} - e_{ex} = l_{\Delta h} \cdot \eta_e;$$

$$\eta_e = \frac{e_{aux} - e_{ex}}{l_{\Delta h}}.$$

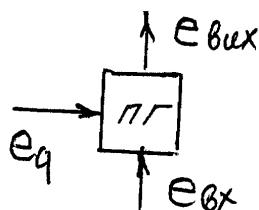
- ПК - поршневий компресор



$$e_{aux} - e_{ex} = h_e \cdot l_{el};$$

$$h_e = \frac{e_{aux} - e_{ex}}{l_{el}}.$$

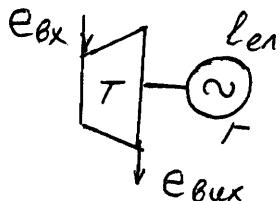
- ТГ - турбогенератор



$$e_{aux} - e_{ex} = e_q \cdot \eta_e$$

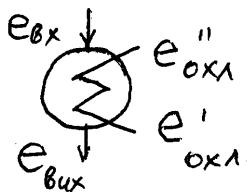
$$\eta_e = \frac{e_{aux} - e_{ex}}{e_q}.$$

- ТГ - турбогенератор



$$(e_{ex} - e_{aux}) \cdot \eta_e = l_{el}$$

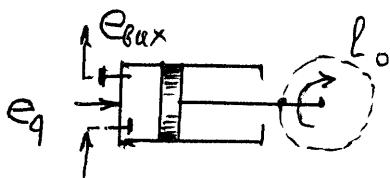
$$\eta_e = \frac{l_{el}}{e_{ex} - e_{aux}}.$$



$$(e_{\text{ex}} - e_{\text{aux}}) \cdot \eta_e = e''_{\text{oxl}} - e'_{\text{oxl}}$$

$$\eta_e = \frac{e''_{\text{oxl}} - e'_{\text{oxl}}}{e_{\text{ex}} - e_{\text{aux}}}.$$

- ДВЗ - двигун внутрішнього згоряння



$$(e_q + e_{\text{ex}} - e_{\text{aux}}) \cdot \eta_e = l_0$$

$$\eta_e = \frac{l_0}{e_q + e_{\text{ex}} - e_{\text{aux}}}.$$

Тема 25. комбіновані цикли ТД

Комбіновані цикли, або бінарні найбільш поширені методи підвищення теплової ефективності використання тепла палива. В комбінованих циклах тепло відходів газів високотемпературних циклів відводиться у низькотемпературний цикл. До таких циклів відносяться: ГТУ + ПСУ ; ГТУ + ДВЗ; ДВЗ + ПСУ ; МГДГ + ГТУ + ПСУ та інші. Всі вказані комбіновані цикли мають надбудову високотемпературного циклу ГТУ , ДВЗ, МГДГ . Знаходять використання також когенераційні установки з прибудовами:

ГТУ + ПК(ВК) ; ДВЗ + ПК(ВК) та інші.

- ГТУ + ПСУ - найбільш поширений бінарний парогазовий цикл.

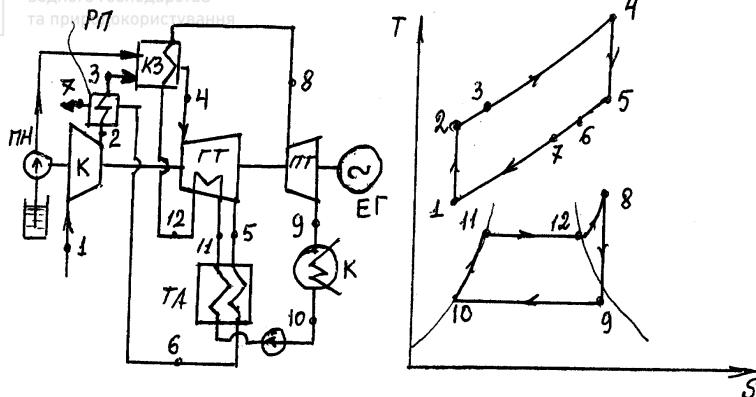


Рис. 25.1. Бінарний цикл (ГТУ+ПСУ)

Процеси:

- 10-11 – ізобарний нагрів води до t_H відбувається в T_A газами після GT за рахунок тепла відхідних газів – процес 5-6;
- 11-12 – процес пароутворення відбувається за рахунок тепла, охолодження ступенів GT ;
- 12-8 – перегрів в KZ ;
- 6-7 – ізобарний нагрів повітря перед KZ за рахунок охолодження продуктів згорання GT .
- 7-1 – ізобарний відвід залишкового тепла відхідних газів до повітря у процесі 2-3;
- 3-4 – ізобарний підвід тепла в KZ до P_T ПСУ (перегрів).
- Бінарний цикл $ДВЗ+ГТУ$.

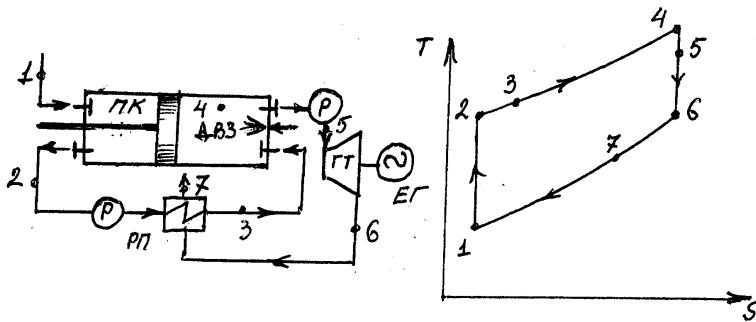


Рис. 25.2. Бінарний цикл (ДВУ+ГТУ)

Процеси: 1-2 – стиск повітря в *ПК*, який подається у розширювач *P* для вирівнювання тиску і далі у процеси 2-3 підігрівається за рахунок тепла відхідних газів після *ГТ* у процесі 6-7. Стиснуте повітря подається у *ДВЗ* з підводом тепла при $P = const$ у процесі 3-4. Продукти згорання подаються у розширювач *P* у процесі 4-5. Адіабатне розширення 5-6 в *ГТ*.

- Бінарний цикл *ДВЗ+ПСУ*.

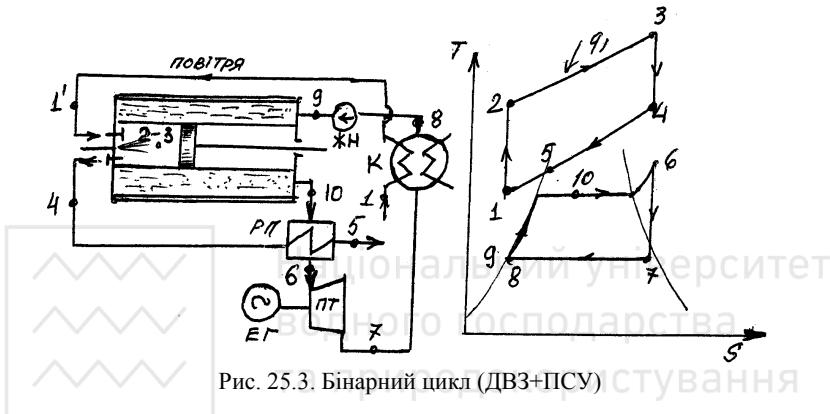


Рис. 25.3. Бінарний цикл (ДВЗ+ПСУ)

Процеси в дізелі: 1-2; 2-3; 3-4; 4-5 – в *РП*; 5-1 – випуск.

Процеси в *ПСУ*: 6-7; 7-8; 8-9; 9-10 – ізобарний процес пароутворення в *ДВЗ*; 10-6 – ізобарне перетворення вологої пари в перегріту в *РП*.

2) Комбінований цикл *МГДГ+ПСУ+ГТУ*.

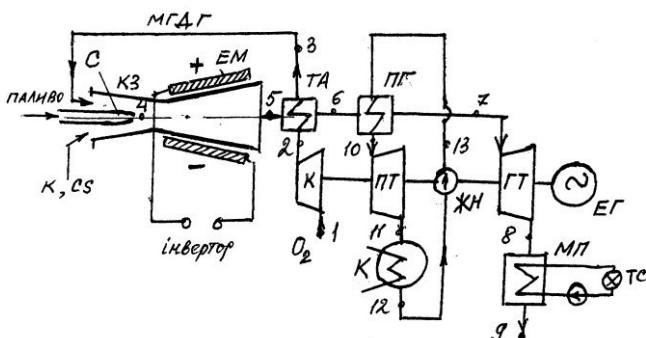


Рис. 25.4. Схема комбінованого циклу

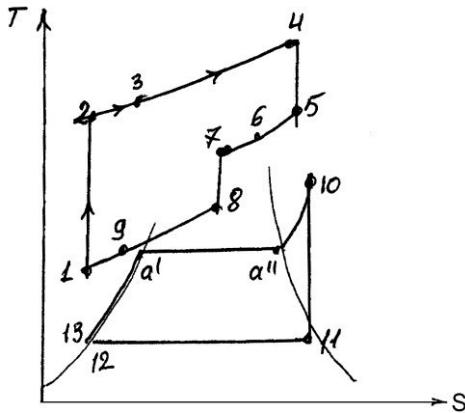


Паливо – високоякісне рідке. K - калій, Cs - цезій – присадки для створення плазми іонізованого середовища з хаотичним рухом позитивних і негативних іонів при t більш $2000^\circ C$. Паливо подається через сопло C з підсмоктуванням кисню O_2 , який подається компресором - K з нагрівом до високих температур в TA .

Продукти згорання розширяються у соплі ЛАВАЛЯ до понадзвукової швидкості і пересікають електромагнітне поле, яке створюється електромагнітами EM . Рух іонів упорядковується і в інверторі постійний струм перетворюється в змінний.

Продукти згорання, які мають високу температуру віддають тепло в $ПГ$ для отримання перегрітої пари, яка розширяється у $ПТ$, конденсується у конденсаторі K і живильним насосом $ЖН$ знову подається в $ПГ$, після якого продукти згорання подаються у цикл $ГТУ$, а далі в ереженому підігрівачі використовуються для потреб теплофікації – опалення, вентиляції і гарячого водопостачання. TC - тепловий споживач. K , $ПТ$, $ГТ$ і $Г$ - на одному валу. Технічна робота, яку виконує $ПТ$ і $ГТ$ витрачається для приводу компресора і живильного насосу. Корисна частина технічної роботи витрачається на отримання електроенергії в $ЕГ$. Така установка може мати ККД до 80%.

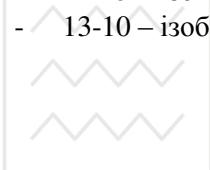
Комбінований цикл зображений в $T - S$ діаграмі.





Процеси:

- 1-2 – адіабатний стиск в K ;
- 2-3 – ізобарний нагрів O_2 в TA ;
- 3-4 – ізобарний процес підводу тепла (згорання);
- 4-5 – адіабатне розширення у соплі ЛАВАЛЯ;
- 5-6 – ізобарний нагрів O_2 в TA ;
- 6-7 – ізобарний процес генерації пари в $\Pi\Gamma$;
- 7-8 – адіабатне розширення у ΓT ;
- 8-9 – ізобарний нагрів мереженої води у $M\Gamma$;
- 9-10 – ізобарний відвід q_2 з відхідними газами;
- 10-11 – адіабатне розширення у $\Pi\Gamma$;
- 11-12 – ізобарно-ізотермічна конденсація;
- 12-13 – ізохорний стиск у $\mathcal{J}H$;
- 13-10 – ізобарний процес добування перегрітої пари у $\Pi\Gamma$.



**3. Методичні рекомендації до лабораторних занять**

ТЕМИ розрахунково-лабораторних робіт	семестр	годин	
		форма навчання	
		дenna	заочна
Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового робочого тіла	III		
1. Параметри стану PT		2	
2. Термометрія		2	
3. Манометрія		2	
4. Рівняння стану газу		2	
5. Газові суміші		2	
6. Теплоємність газів		2	
7. Дослідження ізохори		2	
8. Дослідження політропи		2	2
Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального газу			
9. Водяна пара $h - s$ діаграма		2	2
10. Процеси водяної пари		2	2
11. Вологе повітря		2	
12. $h - d$ діаграма		2	2
13. Витікання PT		2	
Усього за семестр		26	8
Змістовий модуль 3. Термодинаміка циклів $T\Delta$	IV		
1. Дослідження процесів PK		2	
2. Визначення роботи PK		2	
3. Цикл DVZ		2	
4. Цикл DEC		2	
5. Цикл PSU (котельня)		2	
6. ТЕП PSU		2	
Усього за семестр		12	-
Усього за навчальний рік		38	8

Лабораторні роботи проводяться згідно методичним розробкам (інструкціям).



Параметри стану робочого тіла

2) **Термометрія** – прилади для вимірювання температури PT .

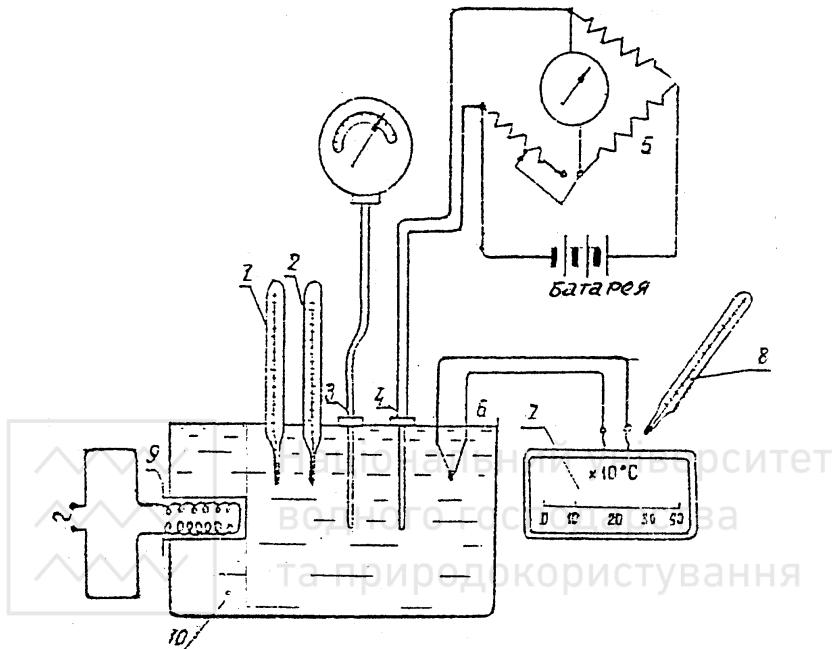


Рис. 3.1. Термометрія

- 1, 2 – ртутні (спиртові) скляні термометри;
3 – монометричний термометр;
4 – термометр опору з вимірювальним містом 5;
6 – термопара з мілівольтметром 7 і термометром холодного стану 8;
10 – посудина з водою і електронагрівачем

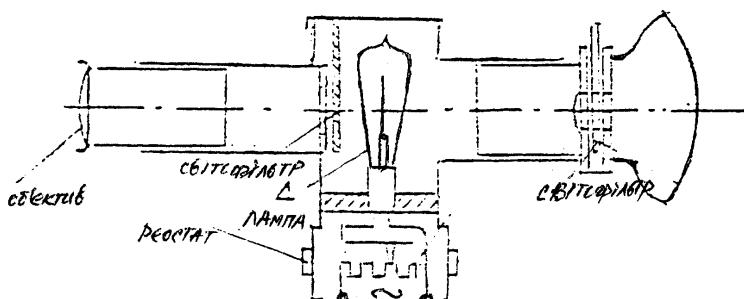
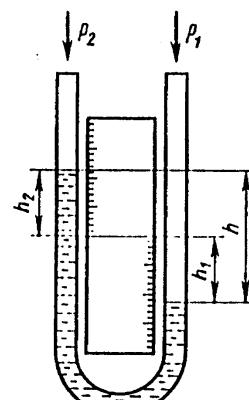
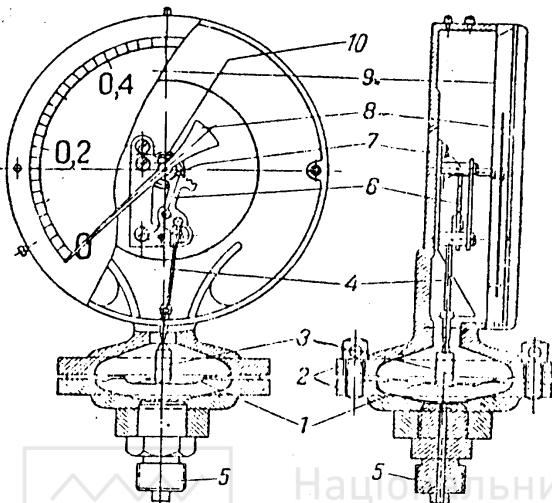


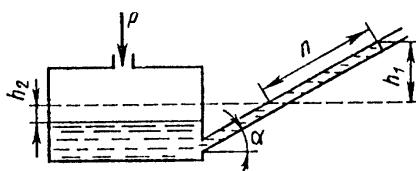
Рис. 3.2. Оптичний пірометр



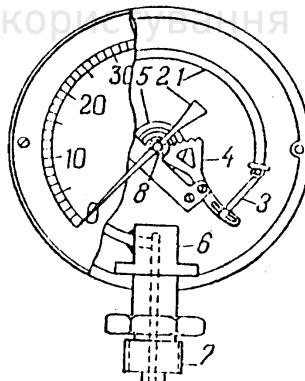
U-подібний рідинний манометр

Манометр мембраний

- 1 - мембрана;
2 - фланці;
3 - стержень;
4 - тяга;
5 - ніпель;
6 - сектор;
7 - трібка;
8 - стрілка;
9 - шкала

**Мікроманометр**

$h_1 = n \sin \alpha \rho = K \Pi$; h_2 - нехтуємо
К - стала приладу

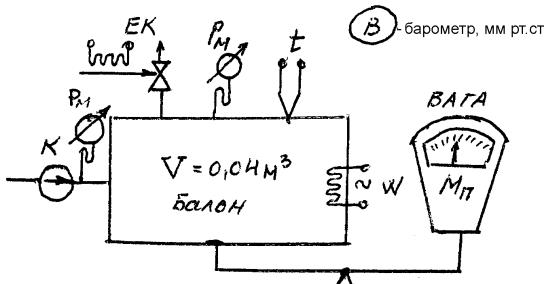
**Манометр трубчастий**

- 1 - пружина;
2 - стрілка;
3 - поводок;
4 - сектор;
5 - пружина;
6 - тімач;
8 - трібка;
7 - ніпель

Рис. 3.3. Манометрія



3) Схема установки



$$P_6 = \frac{B}{750}, \text{ бар}$$

$$P_{a\bar{o}c} = P_M + P_6$$

EK - електроклапан;

K - компресор;

W - нагрівник
ватметром.

Рис. 3.4

3) Питомий об'єм $v = \frac{V}{M}, \frac{m^3}{kg}$; ρ - густина; $\rho = \frac{M}{v}, \frac{kg}{m^3}$.

4) Ентальпія $h = C_p T, \frac{kJ}{kg}$; $C_p = \frac{\mu c_p}{\mu}$; $\tilde{N}_v = \frac{\mu \tilde{n}_v}{\mu}$.

5) Внутрішня енергія $u = h - 10^2 \cdot P \cdot v, \frac{kJ}{kg}$; P - в бар.

6) Ентропія: $S = C_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{P}{1,013}, \frac{kJ}{kg \cdot K}$;

$$S = C_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{v}{v_H}, \frac{kJ}{kg \cdot K};$$

$$R = \frac{8314}{\mu}, \frac{kJ}{kg \cdot K}; v_H = \frac{P_H \cdot T_H}{R}, \frac{m^3}{kg}; \left(\frac{\partial S}{\partial v} \right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v.$$

Перевірка рівняння стану та газових законів

$Pv = RT$; $Pv\mu = \mu RT$; $PV = MRT$ - закон Клайперона.

$Pv = const$ - закон Бойля-Маріотта.

$\frac{P}{T} = const$ - закон Шарля.

$\frac{T}{v} = const$ - закон Гей-Люссака.

Експериментальна установка (рис.3.4) дозволяє перевіряти



закони ідеальних газів і здійснювати газові процеси розширення, стиску: політропний, ізохорний, ізобарний, ізотермічний, адіабатний.

Заміри початкових і кінцевих параметрів P_i, t_i дозволяють розрахувати показник політропи

$$n = \frac{1}{\frac{T_2 - T_1}{P_2 - P_1}}$$

і з таблиці 5-1 всі характеристики процесу.

4) *Експериментальне визначення* теплоємності газу за допомогою проточного калориметру 1, з електронагрівником 2, компресором 3, вимірювальна шайба 4.

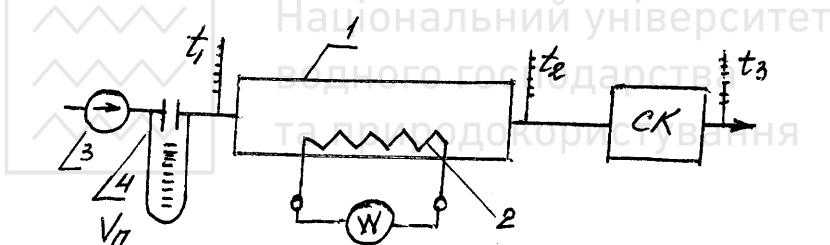


Рис. 3.5. Проточний калориметр з сушильною камерою - CK

З енергобалансу калориметру визначаємо ізобарну об'ємну теплоємність

$$Q = W = V_{II} C'_p (t_2 - t_1), \text{ кВт.}$$

$$C_p = C'_p v_{II}; C_p = C_v + R; \mu C_p = \mu C_v + 8,314.$$

$$v_{II} = \frac{RT_1}{B}, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

W - витрата тепла нагрівника, кВт;

B - барометричний тиск, Па;

$$R = \frac{8314}{\mu_{II}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$



5) Визначення параметрів і процесів вологого повітря

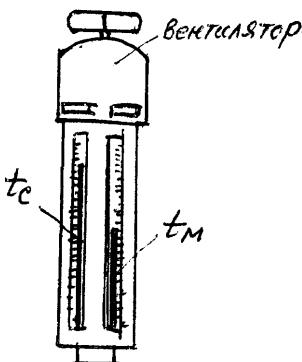


Рис. 3.6. Психрометр

Вимірювання температур «сухого» і «мокрого» термометрів дозволяють визначити параметри вологого повітря за допомогою діаграми $h - d$.

$\varphi, d, P_{\Pi}, h, \rho_{B\Pi}, \mu_{B\Pi}, C_{P_{B\Pi}}$ [тема 11,12], а також розрахувати процеси нагріву і сушки у сушильної камери - CK.

6) Визначення параметрів газової суміші

По результатах заміру складу газової суміші (продуктів згорання, повітря і т. інше) газоаналізатором встановлюємо об'ємні чистки - r_i . Заміряємо також барометричний тиск, розрідження, якщо заміри проводимо на котлоагрегаті.

Розрахунок газової суміші: визначаємо масові частки g_i , молекулярну масу суміші μ_C , питомий об'єм v_C і густину суміші ρ_C , газову сталу R_C , парціальний тиск компонентів газової суміші - P_i [тема 2].

Склад продуктів згорання дозволяє визначити тепловий баланс котлоагрегату, $TД$. Наявність CO в продукті згорання дозволяє визначити втрату від хімічної неповноти згорання - q_3 , встановити ККД камери згорання.

При випробуванні ПСУ, котлоагрегатів потрібно також провести заміри параметрів пари KA - P_1, t_1 і P_2 . При заданій потужності ПСУ, KA є можливість визначити енергетичний (тепловий) і ексергетичний баланси, визначити основні техніко-економічні показники.



При випробуванні дизельної $EC(DEC)$ потрібно знати параметри: заводські характеристики: $\varepsilon, \lambda, \rho, D, S, m$ об/с. При замірах потужності N_{el} або $N_{e\phi}$, показників системи охолодження є можливість скласти тепловий баланс теоретичного і дійсного циклу DVZ і DEC [теми 17, 22].

7) Розрахунок DEC

Склад палива: бензин $C^P = 85,5\%; H^P = 14,5\%; -$

диз.паливо $C^P = 86,0\%; H^P = 13,0\%; O^P = 1\%$

солярка $C^P = 80,2\%; H^P = 12,8\%; O^P = 1\%.$

Питома витрата палива: $\vartheta = \frac{B}{N_{e\phi}}$, г/кВт-год.

карб. DVZ $\vartheta = 280 \div 325$ г/кВт-год.

диз. DVZ $\vartheta = 190 \div 240$ г/кВт-год.

Ізохорна мольна теплоємність продуктів згорання DVZ

$$\mu C_v = 25 \div 29 \frac{\kappa \text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{K}}.$$

Витрати PT (продуктів згорання)

$$M_{PT} = V_\Gamma \cdot \rho_\Gamma, \text{ кг/с}; V_\Gamma = \frac{1}{2} \frac{\pi D^2}{4} \cdot Sn \cdot \chi, \frac{m^3}{c}.$$

$$N_0 = M_{PT} \cdot l_0 \cdot (q_0); N_i = N_0 \cdot \eta_{0i}; N_{e\phi} = N_i \cdot \eta_M.$$

$$V^0 = \frac{1}{0,21} \left(\frac{c}{12} + \frac{H}{h} \right), \frac{m^3}{kg}; \alpha = \frac{V}{V_0} = 0,8 \div 1,1.$$

$$V'_\Gamma = \frac{c}{12} + \frac{H}{h} + 0,21 \frac{m^3}{kg}; V_\Gamma = V'_\Gamma \cdot B, \frac{m^3}{c}.$$

$$N_{e\phi} = \frac{I \cdot U}{1000 \cdot \eta_\Gamma \cdot \eta_M}, \text{ кВт} - \text{для генератору.}$$

$$\eta_{\kappa_3} \approx 0,98; \eta_t \approx 0,5; \eta_{0i} \approx \eta_M \approx 0,8 \div 0,85; \eta_{DVZ} \approx 0,31.$$



8) Дослідження витікання газу через звужене сопло

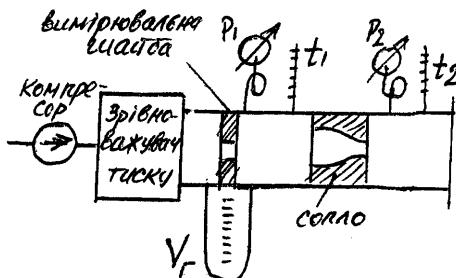


Рис. 3.7. Витікання газу

З відомих P_1 , P_2 , розмірів сопла визначаються: $W_2, M_2, \beta, l_T, C_{36}$ критерій Maxa [тема 13].

4. Методичні рекомендації до практичних занять

ТЕМА практичних занять	Форма навчання			
	Кількість годин			
	Денна семестр		заочна	семестр
Змістовий модуль 3. Цикл ТД				
1. Розрахунок поршневих компресорів – одно – двоступеневих. Розрахунок роботи, потужності, системи охолодження.	2		2	
2. Розрахунок циклів ДВЗ.	2		-	
3. Розрахунок цикла ГТУ з підводом тепла при сталому тиску.	2		2	
4. Розрахунок дросельного цикла холодильної машини (холододіяльноті, холодильного коефіцієнта).	2		2	
5. Розрахунок циклу паросилової установки. Побудова циклу в термодинамічних діаграмах. Розрахунок енергетичного балансу циклу ПСУ.	4		4	
Усього	12		10	



Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ

Тема 1. Параметри стану РТ

1. Питомий тиск, зміст, розмірність.
2. Абсолютний, атмосферний, надлишковий тиск.
3. Питомий об'єм, зміст, розмірність.
4. Густина, зміст, розмірність.
5. Температура, зміст, розмірність.
6. Внутрішня енергія, зміст, розмірність.
7. Ентальпія, зміст, розмірність.
8. Ентропія, зміст, розмірність.
9. Залежність між параметрами.
10. Рівноважний і не рівноважний стан РТ .

Тема 2. Теплофізичні характеристики газового РТ

1. Визначення питомого об'єму, густини при різних фізичних умовах.
2. Газова стала, зміст, розрахунок.
3. Універсальна газова стала, зміст, розрахунок.
4. Мольна ізохорна і ізобарна теплоємності, визначення.
5. Рівняння Майера для масових, об'ємних і мольних теплоємностей.
6. Об'єднаний закон Бойля-Маріотта і Гей-Люссака.
7. Залежність між теплофізичними характеристиками. Формула переходу.
8. Теплоємність, зміст, аналітичний вираз.
9. Види теплоємностей, формули переходу.
10. Теплоємність для різних процесів.
11. Залежність C від температури.
12. Визначення C при низьких температурах.
13. Визначення C при високих температурах.
14. Визначення теплоти через теплоємність в процесах.
15. Визначення середньої C в інтервалі температур.



Тема 3. Газові суміші

1. Поняття газової суміші.
2. Закон Дальтона.
3. Рівняння стану для суміші і для компоненти суміші.
4. Закон Бойля-Маріотта для компоненти суміші.
5. Способи завдання газової суміші.
6. Парціальний тиск компоненти, визначення.
7. Зведений об'єм компоненти, визначення.
8. Залежність між фізичними характеристиками газової суміші (формула переходу).
9. Визначення молекулярної маси суміші.
10. Визначення газової сталої суміші.
11. Визначення питомого об'єму суміші.
12. Визначення густини суміші.
13. Перехід від об'ємної частки до масової
14. Визначення масової і об'ємної С суміші.

Тема 4. Перший закон термодинаміки

1. Одиниці виміру енергії, тепла, роботи, потужності, витрати енергії у системі *СI*.
2. Поняття тепла і роботи.
3. Розрахунок роботи зміни об'єму для процесів.
4. Розрахунок роботи зміни тиску для процесів.
5. Розрахунок тепла у процесів.
6. Перший закон через внутрішню енергію.
7. Перший закон через ентальпію.
8. Перший закон для потоку робочого тіла.
9. Аналіз першого закону термодинаміки.
10. Робоча і теплова діаграми.



Тема 6. Газові процеси

1. Види процесів, обертальні і необертальні процеси.
2. Рівняння процесів.
3. Співвідношення параметрів у процесах.
4. Теплоємність у процесах.
5. Робота зміни об'єму і тиску у процесах.
6. Визначення теплоти у процесах.
7. Визначення зміни внутрішньої енергії у процесах.
8. Визначення зміни ентальпії у процесах.
9. Визначення зміни ентропії у процесах.

Тема 6. Аналіз газових процесів

1. Зображення процесів у робочої діаграмі.
2. Зображення процесів у тепловий діаграмі.
3. Аналіз процесів при показнику політропи менше одиниці.
4. Аналіз процесів при показнику політропи більше К.
5. Аналіз процесів при показнику політропи між 1 і К.
6. Аналіз процесів стиску в діаграмах.
7. Аналіз процесів розширення в діаграмах.
8. Аналіз в тепловий діаграмі зміни внутрішньої енергії, ентальпії.
9. Зображення в тепловий діаграмі теплоти і роботи.

Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального РТ

Тема 7. Диференціальні рівняння термодинаміки

1. Рівняння стану реального РТ.
2. Визначення часткових похідних в диференціальному рівнянні стану реального РТ.
3. Характеристичні функції термодинаміки, діаграми.



4. Зміст вільної внутрішньої енергії, вільної ентальпії.
5. Диференціальні співвідношення термодинаміки.
6. Дифрівняння внутрішньої енергії реального РТ.
7. Дифрівняння ентальпії реального РТ.
8. Дифрівняння ентропії реального РТ.
9. Дифрівняння теплоємності реального РТ.
10. Дифрівняння теплоти реального РТ.
11. Хімічний потенціал.
12. Фазові переходи. Правило фаз Гіббса.
13. Умови рівноваги термодинамічної системи.
14. Третій закон термодинаміки.

Тема 8. Водяна пара

1. $P - v$ - діаграма водяної пари.
2. $T - s$ - діаграма водяної пари.
3. $h - s$ - діаграма водяної пари.
4. Ізобарний процес перетворення води у пару.
5. Види пари.
6. Ступінь сухості вологої пари.
7. Нижня і верхня пограничні криви.
8. Зображення теплоти, ентальпії у тепловий діаграмі.
9. Теплота пароутворення. Теплота вологої пари.

Тема 9. $h - s$ - діаграма водяної пари

1. Побудова діаграми для практичного застосування.
2. Зображення процесів та ліній однакової х.
3. Параметри води при нульовий температурі.
4. Визначення параметрів води.
5. Визначення параметрів киплячої води.
6. Визначення параметрів вологої пари.



7. Визначення параметрів СНП.
8. Визначення параметрів ПП.
9. Таблиці водяної пари.

Тема 10. Процеси водяної пари

1. Аналіз ізохор, розрахунок.
2. Аналіз ізобар, розрахунок.
3. Аналіз ізотерм, розрахунок.
4. Аналіз адіабат, розрахунок.
5. Розрахунок процесів за допомогою таблиць.

Тема 11. Вологе повітря

1. Поняття вологого повітря.
2. Процеси охолодження і нагріву вологого повітря.
3. Абсолютна, відносна вологість, зміст, розрахунок.
4. Вологовміст, зміст, розрахунок.
5. Визначення молекулярної маси вологого повітря.
6. Визначення густини вологого повітря.
7. Визначення теплоємності ВП.
8. Визначення ентальпії ВП.
9. Температура точки роси, практичне застосування.

Тема 12. $h - d$ - діаграма вологого повітря

1. Побудова $h - d$ - діаграми.
2. Визначення параметрів ВП.
3. Температури сухого і мокрого термометрів, точки роси.
4. Розрахунок процесів нагріву і охолодження ВП.
5. Розрахунок процесів сушарні.
6. Розрахунок процесів змішування



1. Поняття процесу витікання.
2. Сопло, дифузор, принцип дії.
3. Технічна робота, розрахунок.
4. Розрахунок швидкості витікання.
5. Розрахунок витрати РТ.
6. Критичне співвідношення тисків.
7. Критичні швидкості, витрата РТ.
8. Вибір форми сопла.
9. Дроселювання, зміна параметрів.

Змістовий модуль 3. Цикли ТД

Тема 14. Другій закон термодинаміки

1. Формулювання другого закону згідно Карно. Умови здійснення циклу ТД.
2. Поняття циклу, прямі, зворотні, обертальні і необертальні цикли.
3. Термічний ККД прямого циклу.
4. Холодильний коефіцієнт зворотного циклу.
5. Цикл Карно, прямий, зворотний, ККД.
6. Ступінь термодинамічної досконалості реальних циклів.
7. Регенеративний цикл Карно.
8. Математичний вираз другого закону термодинаміки.

Тема 15. Поршневий компресор

1. Види компресорів, призначення.
2. Процеси в одноступеневому ПК.
3. Робота ПК при ізотермічному, політропному і адіабатному процесах стиску.
4. Визначення температури стиску.



5. Визначення продуктивності, теоретичної потужності ПК.
6. Охолодження ПК, розрахунок.
7. Енергобаланс ПК.
8. Способи зменшення роботи ПК.
9. Двоступеневий ПК, схема, діаграми.
10. Максимальна ступінь стиску.
11. Визначення кількості ступенів.
12. Розрахунок параметрів у характерних точках.
13. Теплова діаграма, розрахунок тепла охолодження.

Тема 16. Теоретичні цикли ДВЗ

1. Типи ДВЗ. Цикл з ізохорним підводом тепла.
2. Енергобаланс ДВЗ.
3. Цикл з ізобарним підводом тепла.
4. Цикл зі змішаним підводом тепла.
5. Розрахунок параметрів в характерних точках циклу.
6. Розрахунок корисного тепла і роботи.
7. Термічний ККД.
8. Порівняння циклів ДВЗ.

Тема 18. Теоретичні цикли ГТУ

1. Типи циклів ГТУ, принцип дії.
2. Цикл з ізобарним підводом тепла, схема, діаграми.
3. Розрахунок параметрів в характерних точках.
4. Розрахунок корисної роботи і тепла.
5. Термічний ККД.
6. Енергобаланс ГТУ



Тема 19. Методи підвищення теплової ефективності циклу ГТУ

1. Цикл ГТУ з регенерацією тепла, тепло регенерації, ККД.
2. Закрита схема ГТУ, розрахунок.
3. Багатоступеневі ГТУ, розрахунок.

Тема 20. Теоретичні цикли холодильних машин

1. Способи зниження температури РТ.
2. Адіабатний і дросельний ефекти зниження Т.
3. Дроселювання водяної пари.
4. Робочі тіла ХМ.
5. Цикл детандерної ХМ, схема, діаграми.
6. Розрахунок Дт, ХМ.
7. Холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт.
8. Дросельна ХМ, схема, діаграми.
9. Теоретичний і дійсний цикли Др, ХМ.
10. Тепловий розрахунок Др, ХМ.
11. Діаграма $lg P - h$ Др, ХМ.
12. Холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт Др. ХМ.

Тема 21. Цикли ПСУ

1. Принципова технологічна схема ПСУ.
2. Зображення циклу ПСУ в термодинамічних діаграмах.
3. Ізобарний процес добування пари в ПГ.
4. Адіабатний процес розширення пари в турбіні.
5. Процеси конденсації і стиск конденсату в К і ЖН.
6. Зображення підведеного, відведеного тепла в теплової діаграмі, розрахунок.
7. Тепло живильної води, водяного економайзера, тепло екранів, пароперегрівнику, розрахунок.



8. Розрахунок тепла вологої пари при заданої X .

9. Корисне тепло і робота циклу.

10. Дійсний процес розширення пари в турбіні, внутрішній відносний ККД.

11. Термічний ККД, визначення, способи його підвищення.

Тема 22. Енергобаланс циклу ПСУ

1. Теплові втрати у циклі ПСУ.

2. Енергобаланс в кДж/кг.

3. Енергобаланс в кВт.

4. Потужності циклу ПСУ, визначення.

5. ККД циклу ПСУ, визначення.

6. Абсолютні і відносні ККД.

7. Загальний ККД ПСУ.

8. Питома витрата пари і тепла.

9. Цикл ПСУ на насиченої пари.

Тема 23. Методи підвищення теплової ефективності циклу ПСУ

1. Вторинний (проміжний) перегрів пари.

2. Вибір тиску і температури вторинного перегріву.

3. Схема і діаграми циклу ПСУ зі вторинним перегрівом.

4. Розрахунок циклу зі вторинним перегрівом, ККД.

5. Комбіноване вироблення електричної і теплової енергій.

6. Основи теплофікації.

7. Цикл ТЕЦ з протитисковими турбінами - P .

8. Цикл ТЕЦ з турбінами ПТ, Т (з відборами).

9. Побудова процесу розширення пари в турбіні в $h-s$ -діаграмі.

10. Коефіцієнт використання тепла палива на ТЕЦ.

11. Визначення тепла промислового і теплофікаційного відбору.



12. Недовироблення електроенергії на промисловому і теплофікаційному відборах, термічний ККД.
13. Регенеративний цикл ПСУ, схема, діаграми.
14. Цикл ПСУ з граничної регенерацію, термічний ККД циклу на насиченої і перегрітої пари.
15. Розрахунок РП поверхневого і змішувального типу, способи під'єднання РП.
16. Побудова процесів в $h-s$ діаграмі.
17. Термічний ККД циклу ПСУ з регенерацію.
18. Розрахунок тепла регенерації.
19. Ексергія робочого тіла і тепла.
20. Ексергетичний метод дослідження циклів ТД.
21. Зображення ексергії в $h-s$ і $T-s$ діаграмах.
22. Ексергетичний баланс ПСУ (ПГ, ТГ, К, ЖН) та інших ТД.

Тема 24. Комбіновані цикли ТД

1. Комбінований цикл ГТУ + ПСУ.
2. Комбінований цикл ДВЗ + ГТУ.
3. Комбінований цикл ДВЗ + ПСУ.
4. Комбінований цикл МГДГ + ПСУ + ГТУ.

6. Контрольні вправи

Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ

Тема 1. Параметри стану РТ

1. Сила $5 \cdot 10^6$ Н діє на поршень діаметром 400 мм, $B=750$ мм рт.ст. Визначити абсолютний тиск.
2. Визначити $D_{\text{зан}}$, якщо $D_i \approx 580$ мм рт.ст., висота води над ртуттю 150мм вод.ст. $\hat{A} = 770$ мм рт.ст.
3. Розрідження в конденсаторі по вакуумметру 708 мм рт.ст. $\hat{A} = 745$ мм рт.ст. Визначити абсолютний тиск у Па.
4. Визначити $D_{\text{зан}}$, якщо манометр показує 10 бар. $\hat{A} = 730$ мм рт.ст.



рт.ст. Виразити тиск в Па, МПа.

5. Визначити масу газу, якщо об'єм газу 3000 л і густина 1,2 кг/м³.

6. Тиск газу по манометру 765 мм рт.ст. $\hat{A} = 720$ мм рт.ст. Визначити абсолютний тиск в Па, в м. вод.ст., в бар.

7. Температура водяної пари $950^{\circ}F$, яка температура буде в К, в $^{\circ}C$.

8. Перевести $-10^{\circ}C$ в $^{\circ}F$.

9. Ртутний вакуумметр, приєднаний до посудини, показує розрідження 420 мм рт.ст. Тиск повітря $B = 99$ КПа. Визначити $D_{\text{абс}}$ у посудині в МПа, бар.

10. Тиск по манометру 1,5 МПа. $\hat{A} = 740$ мм рт.ст. Визначити $D_{\text{абс}}$.

11. По манометру $P_1 = 2,5$ МПа, $P_2 = 0,5$ бар. $\hat{A} = 700$ мм рт.ст. У скільки разів знизився тиск?

12. У посудині об'ємом 300 л знаходиться 0,15 кг газу при розрідженні 500 мм рт.ст. Визначити абсолютний тиск, густину, при $\hat{A} = 745$ мм рт.ст.

13. Встановити, чи однакові стани робочого тіла, що характеризуються такими значеннями параметрів: $P_1 = 0,15$ МПа, $\rho_1 = 0,75$ кг/м³; другий стан: $P_2 = 1125$ мм рт.ст., $V_2 = 6$ м³, $M = 4,5$ кг ?

14. У посудині об'ємом 500 л міститься 0,368 кг водяної пари при надлишковому тиску 0,76 бар. Визначити абсолютний тиск пари у посудині, а також густину, якщо $\hat{A} = 750$ мм рт.ст.

15. Балон об'ємом 40 л вміщує 1,98 кг вуглекислого газу при нульовій температурі. Балон витримує тиск 30 МПа. При якій температурі балон може розірватися?

16. Надлишковий тиск кисню у балоні об'ємом 100 л дорівнює 0,9 МПа при температурі $20^{\circ}C$. Після підкачування тиск збільшився до 10,4 МПа при температурі $70^{\circ}C$. Скільки кг кисню додано у балон? $B = 1$ бар.

17. Визначити густину кисню при розрідженні 175 мм рт.ст. і



температури 13°C . $B = 1$ бар.

18. При стисканні ідеального газу об'єм його зменшився у 3,6 рази, а температура збільшилась від 23 до 150°C . Як при цьому змінився тиск газу?
19. У балоні об'ємом 100 л знаходиться повітря при тиску 730 мм рт.ст. і температурі 20°C . За який час компресор наповнить балон до 10 бар і 40°C , якщо продуктивність компресору $5 \text{ m}^3/\text{хв}$?
20. Газ притиску 5 бар і температурі 40°C має об'єм 100 л. Який об'єм буде при нормальнih фізичних умовах?
21. У повітряпідігрівник надходить повітря з витратою $20 \text{ m}^3/\text{s}$ при манометричному тиску 500 мм рт.ст. і температурі 20°C . При ізобарному нагріві до 250°C яка буде витрата повітря?
22. У циліндрі знаходиться повітря при тиску по манометру $0,7$ бар. Після ізотермічного стиску об'єм зменшився у два разі. Як зміниться показання манометру, якщо $\hat{A} = 740$ мм рт.ст.?
23. Яка найменша кількість балонів об'ємом 100 л потрібна для перевезення 200 кг кисню, якщо при температурі 27°C максимальний тиск у балоні за манометром 160 бар ?

Тема 2. Теплофізичні характеристики газового РТ

1. Один кмоль газу за нормальнih умов має густину $0,804\text{kg/m}^3$. Який це газ?
2. Визначити густину і питомий об'єм водню за нормальнih умов.
3. Визначити для CO_2 : ρ, R , теплоємності при нормальнih умовах та низькій температурі. Теж саме визначити для H_2CO .
4. Визначити густину CO при $P = 10$ бар, $t = 100^{\circ}\text{C}$.
5. Визначити теплоємності для азоту при $t = 20^{\circ}\text{C}$.
6. Привести об'єм повітря у балоні 20 лі масою 2 кг до нормальних фізичних умов.
7. Визначити молекулярну масу газу, який при тиску $2,5$ бар і температурі 75°C має густину $2,71 \text{ kg/m}^3$.



8. На скільки більше вміститься у балон 40 л CO_2 ніж H_2 при температурі 45°C і тиску за манометром 15 МПа, якщо $B = 1$ бар?
9. Визначити середню теплоємність в інтервалі температур $300 - 1200^\circ\text{C}$ для азоту при сталому тиску.
10. Визначити теплофізичні характеристики повітря при нормальних фізичних умовах.
11. Визначити середню ізохорну теплоємність азоту в інтервалі температур $400-800^\circ\text{C}$.
12. Визначити масу кисню об'ємом 4 m^3 і температурі 80°C . Тиск по манометру 0,04 МПа. $B = 103990 \text{ Па}$.
13. На скільки зміниться густина газу при сталої температурі, якщо тиск зменшується від 1,8 МПА до 300 Па.
14. Знайти масу водню і кисню при тиску 0,06 МПа і $t = 100^\circ\text{C}$.
15. Який об'єм займає азот у кількості 10 кмоль при нормальних фізичних умовах.
16. Який об'єм займає 1 кмоль газу при $P=2 \text{ МПа}$ і $t = 200^\circ\text{C}$.

Тема 3. Газові суміші

1. Склад суміші: $r_{\text{O}_2} = 55\%$, $r = 45\%$, $P_c = 0,3 \text{ МПа}$, $t = 100^\circ\text{C}$. Визначити: густину, питомий об'єм, молекулярну масу, газову стату, масові частки.
2. Розрахувати теплофізичні характеристики для продуктів згорання: $r_{\text{CO}_2} = 13\%$, $r_{\text{CO}} = 0,6\%$, $r_{\text{N}_2} = 80\%$, $r_{\text{O}_2} = 6\%$.
3. Газова суміш має склад: $M_{\text{CO}} = 10 \text{ кг}$, $M_{\text{H}_2} = 12 \text{ кг}$. Визначити фізичні характеристики суміші.
4. Газова суміш має склад: $V_{\text{CO}} = 5 \text{ м}^3$, $V_{\text{O}_2} = 2 \text{ м}^3$. Визначити фізичні характеристики суміші.
5. Визначити манометричний тиск суміші: $r_{\text{O}_2} = 0,1$, $r_{\text{N}_2} = 0,9$, якщо $M_C = 20 \text{ кг}$, $V_C = 2 \text{ м}^3$, $t_C = 100^\circ\text{C}$, $B = 1$ бар.
6. Визначити об'ємну та масову ізобарну теплоємності



суміші, яка має склад $r_{N_2} = 0,6$, $r_{CO} = 0,4$ при $i = 20^\circ\text{C}$.

7. Визначити газову сталу суміші, яка складає: $V_{CO_2} = 1 \text{ м}^3$,
 $V_{O_2} = 1,5 \text{ м}^3$.
8. У повітряпідігрівник надходить $2 \text{ м}^3/\text{с}$ повітря при температурі 25°C і надлишковому тиску 272 мм рт. ст. Визначити швидкість повітря, якщо повітряпровід має прямокутний переріз $1,6 \times 2,3 \text{ м}$. Температура повітря 220°C .
 $B = 740 \text{ мм рт.ст.}$
9. Суміші аміаку з повітрям вибухонебезпечні, якщо в них міститься від 16 до 28% NH_3 . Визначити. Чи можна використовувати суміш газів, в якій міститься 0,2 кг аміаку і 0,5 кг повітря.
10. Газова суміш має такий масовий склад: $CO_2 = 12\%$,
 $O_2 = 8\%$, $N_2 = 80\%$. До якого тиску треба стиснути суміш, що знаходиться за нормальніх умов, щоб густина її становила $1,6 \text{ кг}/\text{м}^3$, а температура залишилась незмінною?
11. Знайти парціальні об'єми компонентів суміші, масова частка яких: $H_2 = 40\%$, $SO_2 = 50\%$, $CO_2 = 10\%$, якщо об'єм суміші 2 м^3 .
12. У посудину об'ємом $3,5 \text{ м}^3$, яка містить газ CO притиску $0,15 \text{ МН}/\text{м}^2$ і температурі 22°C , підведені, 4 кг газу CO_2 . Визначити число кіломолів суміші, її об'ємний склад, а також температуру суміші, якщо після змішування тиск дорівнює $0,21 \text{ МН}/\text{м}^2$.
13. Масовий склад суміші $g_{N_2} = 0,8$, $g_{O_2} = 0,2$. Об'єм суміші 100 л. Знайти масу суміші.
14. Визначити парціальний тиск компонентів суміші при $V_{O_2} = 6 \text{ м}^3$, $V_{H_2} = 2 \text{ м}^3$, $P_O = 4 \text{ бар}$.
15. Визначити об'єм суміші при $M_{CO} = 10 \text{ кг}$, $M_{O_2} = 5 \text{ кг}$.
16. Визначити μ_C , R_C , ρ_C при $M_{CO_2} = 1 \text{ кг}$, $M_{O_2} = 3 \text{ кг}$.
17. Визначити M_C при $V_{CO_2} = 7 \text{ кг}$, $V_{CO} = 15 \text{ кг}$.



Тема 4. Перший закон термодинаміки

1. Знайти витрату палива, теплота згоряння якого $33,9 \text{ МДж}/\text{кг}$, ККД перетворення в корисну енергію 35% для установки потужністю 25 МВт .
2. За зміну на ТЕС спалено 10 вагонів вагою 100t вугілля. Теплота згоряння палива $25 \text{ МДж}/\text{кг}$. ККД ТЕС 40% . Яка потужність ТЕС?
3. Яка витрата повітря для охолодження генератору потужністю 20 МВт , ККД генератору 97% , температура повітря холодного 15°C , гарячого 50°C .
4. У посудині, місткість якої 200 л , знаходиться азот під тиском $p_1 = 5 \text{ МПа}$ і при температурі $t_1 = 30^\circ\text{C}$. Яку кількість теплоти (кДж) необхідно підвести, щоб температура газу (процес $v=const$) підвищилася до $t_2 = 300^\circ\text{C}$? Вважати газ ідеальним з теплоємністю $c_v = 0,75 \text{ кДж}/(\text{кг К})$.
5. Цикл складається з 4 процесів: $12, 23, 34, 41$. Характер процесів $12, 34$ - $v=const$. У процесах $23, 41$ теплообмін відсутній. $Q_{12} = 7,165 \text{ ккал}$, $Q_{34} = -11,942 \text{ ккал}$, $L_{23} = -90 \text{ кДж}$. Визначити L_{41} і зміну внутрішньої енергії у кожному процесі (кДж).
6. Повітря, об'єм якого 5 м^3 , тиск $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ і температура $t_1 = -10^\circ\text{C}$ нагрівається в теплообміннику у процесі $p = const$ до $t_2 = 50^\circ\text{C}$. Знайти кількість підведеної до повітря теплоти (кДж), якщо вважати газ ідеальним з теплоємністю $c_p = 1 \text{ кДж}/(\text{кг К})$.
7. Цикл в якому до робочого тіла підведено $7,165 \text{ ккал}$ теплоти, складається з процесів $1a2$ і $2b1$, робота у процесі: $1a2$ $L_{1a2} = -70 \text{ кДж}$, а у процесі $2b1$ зміна внутрішньої енергії дорівнює 50 кДж . Визначити $Q_{1a2}, \Delta U_{1a2}, L_{2b1}, Q_{2b1}$ (кДж). Знайти роботу адіабатного процесу $1c2$.
8. У посудину, яка містить 10kg води при температурі 20°C , поміщене електронагрівник, потужність якого $1,5 \text{ кВт}$.



Визначити за який час (хв.) вода нагрівається до температури $100^{\circ}C$, теплоємність води $c_p = 4,19 \text{ кДж/(кг К)}$. Теплові втрати в навколошнє середовище 10% .

9. Цикл складається з 4 процесів: 12, 23, 32, 41. Характер процесів 12, 34 ізохорний, $v=const$. У процесах 23, 41 теплообмін відсутній $Q_{12} = 10,748 \text{ ккал}$, $Q_{34} = -17,913 \text{ ккал}$, $L_{41} = 105 \text{ кДж}$. Визначити L_{23} і зміну внутрішньої енергії у кожному процесі (кДж).
10. Круговий процес (цикл) складається з трьох процесів: ав, вс, са; сумарна робота циклу дорівнює 150 кДж . $Q_{av} = 23,88 \text{ ккал}$, $\Delta U_{av} = -100 \text{ кДж}$, $L_{vc} = Q_{vc} = 200 \text{ кДж}$. Знайти L_{av} , ΔU_{vc} , L_{ca} , Q_{ca} , ΔU_{ca} (кДж).
11. Визначити роботу (кДж) ізобарного розширення газу від $V_1 = 2$ до $V_2 = 6 \text{ м}^3$, якщо $p_{нар} = 4 \text{ бар}$, $p_B = 750 \text{ мм. рт. ст.}$ Чому дорівнює зміна потенціальної енергії тиску у цьому процесі?
12. У адіабатному процесі стискування в компресорі внутрішня енергія робочого тіла збільшилась на 500 МДж , а ентальпія – на 700 МДж . Визначити кількість теплоти, роботу зміни об'єму і наявну роботу процесу (МДж).
13. Круговий процес (цикл) складається з процесів 1a2 і 2b1. Сумарна кількість теплоти циклу $Q = -30 \text{ кДж}$, $L_{1a2} = 70 \text{ кДж}$, $\Delta U_{1a2} = 30 \text{ кДж}$. Знайти Q_{1a2} , L_{2b1} , ΔU_{2b1} , Q_{2b1} .
14. Круговий процес (цикл) складається з процесів 1a2 і 2b1, сумарна робота циклу дорівнює 100 кДж , $L_{1a2} = 200 \text{ кДж}$, $Q_{1a2} = 300 \text{ кДж}$. Знайти Q_{1a2} , L_{2b1} , ΔU_{2b1} (кДж).
15. Теплота згоряння палива Q_n^p мазуту $4200 \frac{\hat{e}\ddot{A}\alpha}{\hat{e}\tilde{a}}$, вугілля $Q_n^p = 25000 \frac{\kappa \text{Дж}}{\kappa \text{г}}$, газу $Q_n^p = 39000 \frac{\kappa \text{Дж}}{m^3}$. Яке питоме вироблення вказаних палив в $\text{kBt} \cdot \text{год}^{-1}$?



16. Питоме вироблення атомної енергії урану дорівнює 23млн.
 $\frac{\text{кВт}\cdot\text{г}}{\text{кг}}$. На скільки це більше вказано у попередньому прикладі палив ?
17. Визначити витрату урану для реактору потужністю 500000 кВт за рік, якщо теплота розщеплення урану $23 \cdot 10^6 \frac{\text{кВт}\cdot\text{г}}{\text{кг}}$.
18. ПСУ має потужність 100МВт і ККД 30%. Визначити витрату палива за годину, якщо теплота згоряння $Q_h^p = 25000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.
19. За зміну (8 годин) на ТЕС спалено 8000 т. вугілля з $Q_h^p = 25 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ з ККД 35%. Визначити потужність ТЕС і вироблену електроенергію.
20. Автомобіль масою 1,5т. при швидкості 40км/год зупиняється при гальмуванні. Маса гальму 15кг, теплоємність металу $0,46 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{к}}$. Початкова температура $t_1 = 10^\circ\text{C}$. Яка кінцева температура t_2 ?
21. Знайти зміну внутрішньої енергії повітря при його охолодженні від 100°C до 20°C . $C=\text{const}$.
22. Визначити зміну ентальпії з попередніх умов.
23. Визначити зміну ентропії у прикладах 21 і 22.
24. Знайти зміну внутрішньої енергії, ентальпії, ентропії, для 3 м^3 повітря, яке нагрівається від 20°C до 80°C .
25. При ізобарному нагріві повітря від 10°C до 100°C як змінюється внутрішня енергія і ентальпія?

Тема 5. Газові процеси

1. 5 м^3 повітря при $P_1 = 2,6 \text{ МПа}$, $t_1 = 450^\circ\text{C}$ виконують роботу у політропному процесі 940 кДж, при цьому внутрішня енергія зменшується на 400 кДж. Розрахувати процес.
2. У процесі політропного розширення до азоту підводиться 83,7 кДж теплоти. Знайти зміну внутрішньої енергії азоту і виконану роботу, якщо об'єм азоту збільшився у 10 разів, а тиск його зменшився у 8 разів.



3. 1,5 кг азоту стискується політропно від $p_1 = 0,09 \text{ МПа}$ і $t_1 = 17^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,7 \text{ МПа}$. Кінцева температура при цьому дорівнює 100°C . Яку кількість теплоти необхідно відвести, яку роботу витратити і який показник політропи у цьому процесі?
4. При ізотермічному стисненні $0,3 \text{ м}^3$ кисню, початкові параметри якого $p_1 = 1 \text{ МПа}$ і $t_1 = 300^\circ\text{C}$, відводиться 500 кДж енергії. Визначити кінцевий тиск і зміну ентропії у процесі.
5. $0,5 \text{ кг}$ деякого газу, температура якого $T_1 = 300\text{K}$, розширюється при $T = const$ зі зменшенням тиску у 5 разів і при цьому відбувається робота $995,7 \text{ кДж}$. Визначити, який це газ.
6. Повітря об'ємом $V_1 = 3000\text{l}$ розширюється ізобарно зі збільшенням об'єму у 1,5 рази. При цьому підводиться теплота у кількості 627 кДж . Визначити тиск, при якому проходить процес розширення та роботу, яка відбувається, якщо $C_p = 1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$.
7. Ідеальний газ ($\mu = 28 \text{ кг/кмоль}$) у кількості 800 г міститься у посудині об'ємом 485 л при $p_1 = 1,5 \text{ бар}$. Визначити масову ізобарну і масову ізохорну теплоємності (c_p, c_v) цього газу, якщо при нагріванні до температури 225°C його енталпія збільшилась на 42 ккал .
8. Повітря при тиску $p_1 = 0,45 \text{ МПа}$, розширюючись адіабатно до $p_2 = 0,12 \text{ МПа}$, охолоджується до температури $t_2 = -45^\circ\text{C}$. Визначити початкову температуру і питому роботу у процесі.
9. Робоче тіло O_2 ізобарно підвищує енталпію у 2 рази, потім ззовні адіабатно витрачається робота і газ ізохорно повертається у початковий стан. Пошук параметрів: $p_1 = 10 \text{ бар}$, $t_1 = 100^\circ\text{C}$. Визначити p_2, t_2 , питому роботу, кількість теплоти і зміну внутрішньої енергії робочого тіла у процесі $p = const$. Навести схему енергобалансу ізобарного процесу, відобразити цикл на $pv-i Ts$ -діаграмах. Теплоємність газу вважати незалежною від температури. За початок відліку енталпії взяти 0 K .



10. Робоче тіло N_2 ізобарно отримує $q = 120 \text{ кДж/кг}$ теплоти, потім адіабатно знижує температуру і ізотермічно повертається у початковий стан. Початкові параметри: $p_1 = 10 \text{ бар}$, $t_1 = 100^\circ\text{C}$. Визначити t_2 і v_2 , питому роботу і зміну внутрішньої енергії процесу $p = \text{const}$. Навести схему енергобалансу ізобарного процесу. Побудувати цикл на pv – і Ts – діаграмах. Вважати теплоємність газу незалежною від температури.
11. Робоче тіло O_2 адіабатно знижує температуру у 2 рази, потім над газом відбувається робота в ізотермічному процесі і тіло повертається у початковий стан шляхом ізобарного розширення. Початкові параметри: $p_1 = 20 \text{ бар}$, $t_1 = 300^\circ\text{C}$. Визначити роботу в адіабатному процесі і процес: $p = \text{const}$. Навести схеми енергобалансів цих процесів. Відобразити цикл, що складається із трьох процесів, які проходять в ідеальному газі, на pv – і Ts – діаграмах. Вважати теплоємність газу незалежною від температури.
12. Робоче тіло O_2 адіабатно підвищує температуру у 2 рази, потім від газу ізохорно відводиться теплота і тіло ізотермічно повертається у початковий стан. Початкові параметри: $p_1 = 10 \text{ бар}$, $t_1 = 100^\circ\text{C}$. Визначити питому наявну роботу та роботу зміни об'єму процесів, $s = \text{const}$ і $v = \text{const}$. Навести схеми енергобалансів вказаних процесів, пояснивши їх значення. Відобразити цикл, що складається з трьох процесів, які проходять в ідеальному газі, на pv – і Ts – діаграмах. За початок відліку ентальпії взяти 0 К. Вважати теплоємність газу незалежною від температури.
13. Робоче тіло CO_2 ізохорно одержує теплоту, потім адіабатно розширюється та ізотермічно повертається у початковий стан. Початкові параметри: $p_1 = 5 \text{ бар}$, $t_1 = 27^\circ\text{C}$. Визначити зміну внутрішньої енергії, наявну роботу і кінцеву температуру ізохорного процесу, якщо $\Delta h = 200 \text{ кДж/кг}$. Показати схему енергобалансу процесу $v = \text{const}$. Відобразити цикл на pv – і Ts – діаграмах. Вважати теплоємність газу незалежною від температури.



14. Робоче тіло N_2 ізобарно віддає теплоту $q = 120 \text{ кДж/кг}$, потім ізотермічно розширюється і адіабатно повертається у початковий стан. Початкові параметри: $p_1 = 1 \text{ бар}$, $t_1 = 300^\circ\text{C}$. Визначити t_2 і v_2 питому роботу, Δu процесу $p = \text{const}$. Відобразити схему енергобалансу цього процесу. Показати графіки всіх процесів, що утворюють цикл, на pv – і Ts – діаграмах. Взяти $C \neq f$.
15. У закритій посудині об'ємом $0,6 \text{ м}^3$ міститься повітря при тиску $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 20^\circ\text{C}$. У результаті охолодження посудини повітря, яке міститься у ньому, втрачає 105 кДж . Вважаючи теплоємність повітря сталою, визначити, яка температура встановилась після цього у посудині? Знайти наявну роботу.
16. До 1 кг азоту при температурі $t_1 = 25^\circ\text{C}$ і тиску $p_1 = 98 \text{ кПа}$ ізохорно підведено $83,72 \text{ кДж}$ теплоти. Потім газ ізотермічно розширюється, після чого ізобарно повертається у початковий стан. Визначити термічні параметри газу після розширення, роботу ізотермічного процесу і кількість теплоти в ізобарному процесі, вважаючи теплоємність сталою. Побудувати графіки процесів на pv – і Ts – діаграмах.
17. У політропному процесі зміни стану, який починається при параметрах $p_1 = 0,4 \text{ МПа}$ і $t_1 = 127^\circ\text{C}$, 1 кг азоту проходить проміжний стан $p_0 = 0,8 \text{ МПа}$ і $t_0 = 187^\circ\text{C}$. Кінцевий стан досягається після того, як відбулася робота над азотом $l = 550 \text{ кДж/кг}$. Знайти кінцеві параметри p_2, t_2, v_2 .
18. 1 кг повітря при $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ і $t_1 = 111^\circ\text{C}$ розширюється політропно до тиску $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити кінцевий стан повітря (t_2, p_2) і теплоємність процесу, якщо $n = 1,2$. Теплоємність вважати незалежною від температури.
19. Розрахувати політропний процес стиску $1 \text{ кг} \text{ CO}_2$, якщо $\Delta u = 240 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, $l = 200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, $t_1 = 50^\circ\text{C}$, $p_2 = 120 \text{ бар}$.
 $c = \text{const}$



20. Розрахувати політропний процес, у якому здійснюється робота $40 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, об'єм збільшиться у 10 разів, а тиск зменшиться у 8 разів.
21. Визначити показник політропи, якщо об'єм збільшиться у 10 разів, а тиск зменшиться у 8 разів.
22. 7 кг N_2 при $p_1 = 0,7 \text{ МПа}$, $t_1 = 17^\circ C$ розширюється без теплообміну до $p_2 = 1,1 \text{ МПа}$, потім нагрівається при $V = \text{const}$ до початкового тиску. Розрахувати процеси.
23. Розрахувати ізобарний процес, якщо 10 кг N_2 при $p_1 = 800 \frac{\text{kH}}{\text{m}^2}$, $t_1 = 200^\circ C$ змінює об'єм до $V_2 = 4 \text{ m}^3$.
24. Розрахувати процеси зміни стану, якщо CO_2 зменшує об'єм у 5 разів і при $t = \text{const}$, потім при $p = \text{const}$ розширюється до початкового стану. $p_1 = 1,2 \text{ бар}$, $t_1 = 20^\circ C$, $c = \text{const}$.
25. Розрахувати ізохорний процес зміни стану H_2 у якому тиск зростає у 2 рази. $p_1 = 1 \text{ бар}$, $t_1 = 0^\circ C$, $c = \text{const}$.

Тема 6. Аналіз процесів

1. Зобразити в $T - S$ діаграмі роботу CO_2 при його розширенні від $t_2 = 200^\circ C$ до $t_1 = 20^\circ C$ при $n = 1,15$.
2. Зобразити у $P - v$ діаграмі процеси нагріву газу і обґрунтувати зміну параметрів.
3. Зобразити у робочій діаграмі всі процеси охолодження з аналізом.
4. Зобразити у тепловій діаграмі всі процеси розширення і проаналізувати зміну параметрів.
5. Зобразити у тепловій діаграмі всі процеси стиску з аналізом зміни параметрів.
6. Зобразити теплоту у робочій діаграмі для ізобарного процесу.
7. Зобразити теплоту у робочій діаграмі для ізохори.
8. Зобразити роботу зміни об'єму і тиску у $p - v$ діаграмі для ізотерми.



9. Зобразити технічну роботу і роботу зміни об'єму для адіабати у $p - v$ діаграмі.
10. Зробити аналіз I закону термодинаміки для політропних процесів при $0 < n < 1$.
11. Зробити аналіз I закону термодинаміки для політропних процесів при $1 < n < k$.
12. Зробити аналіз I закону термодинаміки для політропних процесів при $n > k$.
13. Аналіз I закону термодинаміки для ізохори у $T - S$ діаграмі.
14. Аналіз I закону термодинаміки для ізобари у $T - S$ діаграмі.
15. Покажіть роботу зміни об'єму для ізотерми у $T - S$ діаграмі.
16. Покажіть роботу зміни тиску для ізотерми у $T - S$ діаграмі.
17. Покажіть роботу зміни об'єму для адіабати у тепловій діаграмі.
18. Покажіть роботу зміни тиску для адіабати у тепловій діаграмі.
19. Зробити аналіз I закону термодинаміки для політропних процесів при $0 < n < 1$ у $T - S$ діаграмі.
20. Зробити аналіз I закону термодинаміки для політропних процесів при $1 < n < k$ у $T - S$ діаграмі.
21. Зробити аналіз I закону термодинаміки для політропних процесів при $n > k$ у $T - S$ діаграмі.
22. У яких процесах від'ємна теплоємність?
23. У яких процесах з підводом тепла температура падає?
24. У яких процесах з відводом тепла температура зростає?
25. Докажіть, чому ізохора більш крутa, ніж ізобара у тепловій діаграмі.

Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального PT

Тема 9. h-S діаграма водяної пари

1. Визначити параметри киплячої води при $p = 5$ бар.
2. Визначити параметри киплячої води при $p = 80$ бар.
3. Визначити параметри вологої пари при $p = 10$ бар, $x = 0,7$.
4. Визначити параметри вологої пари при $p = 2$ бар, $x = 0,2$.
5. Визначити параметри сухої насыченої пари при $p = 7$ бар за допомогою h-S діаграми.



6. Визначити теплоту пароутворення при $p = 50$ бар $t = 400^\circ C$. За допомогою h-s діаграми.
7. Визначити параметри води при $p_e = 3$ бар $t_e = 30^\circ C$.
 8. Визначити параметри СНП при $p = 60$ бар за допомогою h-s діаграми.
 9. Визначити параметри перегрітої пари при $p = 5$ бар $t = 400^\circ C$ за допомогою h-s діаграми.
 10. Визначити параметри перегрітої пари при $p = 50$ бар $t = 500^\circ C$ за допомогою h-s діаграми.
 11. Визначити ентальпію живильної води при $p = 10$ бар.
 12. Визначити тепло підведене у в/е при $p = 80$ бар.
 13. Визначити тепло підведене в екранах ПГ при $p = 40$ бар.
 14. Визначити тепло перегріву при $p = 50$ бар і $t = 400^\circ C$.
 15. Визначити тепло підведене в ПГ при $p = 14$ бар $t = 195^\circ C$.
 16. Визначити тепло підведене до вологої пари при $p = 40$ бар, $x = 0,95$, $t_{жв} = 104^\circ C$.
 17. Визначити тепло підведене в ПГ при $p = 60$ бар, $t_{nn} = 450^\circ C$, $t_{жв} = 140^\circ C$.
 18. В пароперегрівник поступає волога пара при $p = 40$ бар, $x = 0,95$ і перегрівається до $480^\circ C$. Визначити q_{nep} .
 19. Знайти кількість тепла, яке необхідне для нагріву води до t_k при $p = 14$ бар від $104^\circ C$.
 20. Знайти масу та ентальпію водяної пари об'ємом $0,5 \text{ m}^3$ при вологості 10% і при $p = 30$ бар.

Тема 10. Процеси водяної пари

1. До 1 кг води підведено тепло $q = 2000 \frac{\kappa \Delta x}{\kappa \varepsilon}$ при $p = const$, початкові параметри $p_1 = 15$ бар, $t_1 = 60^\circ C$. Визначити t_2 , l , Δu .



2. Перегріта пара при $p_1 = 10$ бар і $t_1 = 500^\circ C$ ізобарно охолоджується до СНП. Визначити: $l, q, l_O, \Delta u, \Delta s$.
3. Адіабатне розширення перегрітої пари: $p_1 = 30$ бар, $t_1 = 600^\circ C$, $p_2 = 0,2$ бар. Визначити: $\Delta u, \Delta h, l, l_T$.
4. Адіабатний стиск вологої пари: $p = 5$ бар, $x = 0,95$, $t_2 = 400^\circ C$. Визначити: $\Delta u, \Delta h, l, l_T$.
5. Ізотермічне розширення вологої пари: $p_1 = 30$ бар, $x = 0,9$, $v_2 = 2 \frac{m^3}{kg}$. Визначити: параметри, $l, q, l_T, \Delta h, \Delta S, \Delta u$.
6. Ізотермічний процес охолодження: $p_1 = 3$ бар, $h_1 = 2300 \frac{kДж}{kg}$, $x_2 = 0,95$. Визначити: $l, q, l_O, \Delta h, \Delta s, \Delta u$, параметри у початковому і кінцевому стані.
7. Ізохорний нагрів: $p_1 = 6,1$ бар, $x_1 = 0,95$, $t_2 = 400^\circ C$. Визначити: параметри, $l_O, \Delta h, \Delta u, \Delta s, q$.
8. Процес охолодження: СНП, $p_1 = 10$ бар, $x_2 = 0,8$. Визначити: параметри $l_O, \Delta h, \Delta u, \Delta s, q$.
9. До 2 кг вологої пари при $p_1 = 15$ бар, $x_1 = 0,85$ підведено $q = 700$ кДж при $p = const$. Розрахувати процес.
10. Суха насичена пара масою $m = 1$ кг під тиском $p_1 = 11$ атм ізохорно нагрівається до температури $t = 500^\circ C$, потім ізотермічно розширяється до тиску $p_2 = 5$ атм і після ізобарного стиснення адіабатно повертається у початковий стан. Визначити параметри пари у перехідних точках. Зобразити графічно схему процесів на $h-s$ діаграмі.
11. Пара масою $m = 10$ кг зі ступенем сухості $x = 0,9$ і тиску $p_1 = 1$ МПа нагрівається у процесі $p = const$ до температури $t_2 = 300^\circ C$. Знайти початкові і кінцеві параметри пари, кількість теплоти, підведеної у процесі, роботу розширення і зміну внутрішньої енергії. Задачу розв'язати за допомогою $h-s$



12. Перегріта пара адіабатно розширюється від тиску $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ і температури $t_1 = 250^\circ\text{C}$ до тиску $p_2 = 0,05 \text{ МПа}$. Знайти за допомогою $h-s$ діаграми параметри пари у початковій і кінцевій точках процесу, роботу розширення, зміну внутрішньої енергії.
13. Пара, маса якої $m = 70 \text{ кг}$, тиск $p_1 = 5 \text{ бар}$ і ступенем сухості $x_1 = 0,8$, стискується адіабатно до стану сухого насыщення, після чого нагрівається при сталому тиску $\Phi_1 = p_2 = p_3$ з підведенням $Q_{23} = 1400 \text{ кДж теплоти}$. Визначити параметри пари в кінці процесів $\Phi_2, T_2, v_2, h_2, p_3, T_3, v_3, h_3$ і роботу $Q_{12}; L_{23}$ у цих процесах. Задачу розв'язати: а) за таблицями ; б) за допомогою $h-s$ діаграмами.
14. У парогенератор надходить 100 кг води під тиском $p = 1,5 \text{ МПа}$ і при температурі $t_1 = 25^\circ\text{C}$. Визначити:
- кількість теплоти, яка потрібна для нагрівання води до температури насыщення; для отримання вологої насыченої пари, ступень сухості якої $x = 0,9$; сухої насыченої пари; перегрітої пари температура якої $t_{n,n} = 250^\circ\text{C}$.
 - термічні та калоричні параметри на початку і в кінці перелічених процесів.
 - відобразити ці процеси на $pv-$, $T\delta-$, hs -діаграмах.
15. У парогенераторі з води, температура якої $t_1 = 25^\circ\text{C}$, при сталому тиску $p = 1,5 \text{ МПа}$ виробляється $M = 150 \text{ кг/год}$ пари. Коли пара надходить у виробничу камеру, то вона дроселює до атмосферного тиску $p = 0,01 \text{ МПа}$. За допомогою $h-s$ діаграми визначити, як змінюється температура у процесі дроселювання, якщо с парогенератора надходить: волога насычена пара, ступінь сухості якої $x = 0,95$; суха насычена пара або перегріта пара, температура перегріву якої $t_3 = 300^\circ\text{C}$. Яку кількість теплоти витрачено для отримання вологої насыченої, сухої насыченої і перегрітої пари? Відобразити процесі на $h-s$ діаграмі.



16. Водяна пара масою $m = 1 \text{ кг}$ під тиском $p_1 = 5 \text{ атм}$ і при температурі $t = 270^\circ\text{C}$ ізохорно змінює стан до тиску $p_2 = 3 \text{ атм}$, потім ізобарно нагрівається, після чого ізотермічно повертається у початковий стан. Визначити кількість теплоти, роботу розширення і наявну роботу в кожному процесі. Побудувати графіки процесів на $h - s$ діаграмі.
17. Суха насичена пара масою $m = 1 \text{ кг}$ під тиском $p = 9,81 \text{ бар}$ ізохорно нагрівається до $t = 350^\circ\text{C}$, потім адіабатно розширюється, і нарешті ізобарно повертається у початковий стан. Визначити зміну параметрів у кожному з цих процесів. Побудувати графіки на $T - s$ і $h - s$ діаграмах.

Тема 12. *h-d діаграма вологого повітря*

1. У вентиляційній системі виробничого приміщення в холодний період року зовнішнє повітря, температура якого $t_{\text{зов}} = -5^\circ\text{C}$ і відносна вологість $\varphi_{\text{зов}} = 60\%$, змішується із внутрішнім повітрям приміщення, температура якого $t_{\text{вн}} = 22^\circ\text{C}$, відносна вологість $\varphi_{\text{вн}} = 80\%$. Після змішування повітря нагрівається у повітронагрівнику до температури припливного повітря $t_n = 26^\circ\text{C}$. Масова витрата припливного повітря, кг/год : зовнішнього – $M_{\text{зов}} = 15 \cdot 10^3$, рециркуляційного – $M_{\text{реу}} = 6 \cdot 10^3$. Визначити параметри суміші повітря і кількість теплоти, яка потрібна для його нагрівання. Задачу розв'язати аналітично і за допомогою $h - d$ діаграми. Відобразити процеси на $h - d$ діаграмі.
2. Кондиціонер має подати в цех заводу $50\,000 \text{ м}^3$ повітря при температурі $t = 15^\circ\text{C}$ і відносній вологості $\varphi = 40\%$. Повітря на вулиці має температуру 0°C і відносну вологість 80%. Визначити, що слід робити, подаючи повітря в цех: зволожувати чи підсуšувати його? Скільки води слід додатково випарувати, або скільки треба відібрati від нього?
3. Під час роботи відносна вологість повітря в майстерні при



температури $t = 15^{\circ}\text{C}$ становить $\varphi = 50\%$. На скільки може знизитися температура вночі, щоб на металевих предметах не конденсувалася водяна пар?

4. За допомогою психрометра встановили, що в одному приміщенні при $t = 0^{\circ}\text{C}$ відносна вологість повітря становить $\varphi = 90\%$, а в другому при $20^{\circ}\text{C} — 50\%$. Повітря якого приміщення (їх об'єми однакові) містить більше водяної пари?
5. Допустима вологість повітря у приміщенні музею не повинна перевищувати $\varphi = 70\%$. Чи виконується ця вимога, якщо покази мокрого і сухого термометрів психрометра дорівнюють відповідно $t_m = 17^{\circ}\text{C}$ і $t_c = 21^{\circ}\text{C}$?
6. У кімнаті при температурі $t = 20^{\circ}\text{C}$ відносна вологість $\varphi_1 = 20\%$. Скільки треба випарувати води, щоб збільшити вологість до $\varphi_2 = 50\%$, якщо кімната має об'єм 40 м^3 ? Молярна маса води $\mu_1 = 0,018 \text{ кг/моль}$ і повітря $\mu_2 = 0,029 \text{ кг/моль}$.
7. У сушарку поміщено матеріал, з якого треба випарити 3000 кг води. Температура зовнішнього повітря $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$ при відносній вологості $\varphi = 40\%$. На вході в сушарку повітря нагрівається до $t_2 = 40^{\circ}\text{C}$ і $\varphi = 85\%$. Визначити кількість повітря, яке має пройти через сушарку.
8. У вологе повітря при $t = 65^{\circ}\text{C}$ і $\varphi = 10\%$, і $p_o = 100 \text{ кПа}$, випаровується вода за адіабатних умов. Температура повітря при цьому знижується до 35°C . Знайти відносну вологість, вологісність повітря в кінцевому стані та кількість води, що випаровується на 1 кг сухого повітря. Забачу розв'язати за допомогою $h - d$ діаграмами.
9. Вологе повітря при $t = 60,5^{\circ}\text{C}$ і $\varphi = 20\%$ у процесі адіабатного насичення взаємодіє з водою при $t = 35^{\circ}\text{C}$, досягаючи $\varphi_2 = 100\%$. Визначити кількість води, що випаровується на 1 кг сухого повітря, коли $p_o = 745 \text{ мм. рт. ст.}$ Побудувати графік процесу на $h - d$ діаграмі.



10. Atmosferne повітря ($p_0 = 745\text{мм. рт. ст.}$), яке має $t_0 = 10^\circ C$ і $\varphi_0 = 80\%$, перш ніж використати для вентиляції приміщень, кондиціонують нагріванням з наступним вдуванням сухої насиченої пари, тиск якої 1атм, до $t = 30^\circ C$ $\varphi_2 = 60\%$. Визначити температуру t_1 повітря після нагрівання, витрату теплоти на попереднє підігрівання повітря і витрату, водяної пари на 1 кг сухого повітря. Задачу розв'язати аналітично за допомогою $h-d$ діаграмами.
11. Вологе атмосферне повітря ($p_0 = 100\text{kPa}$) при $t = 20^\circ C$ і $\varphi = 60\%$ ізобарно нагрівається до $t_2 = 95^\circ C$ і надходить в сушильну камеру, де при сталій ентальпії охолоджується до $t_3 = 35^\circ C$. Визначити витрату сухого повітря і теплоти, що припадає на 1кг вологи, яка видаляється з матеріалу у сушильній камері. Задачу розв'язати аналітично і за допомогою $h-d$ діаграмами.
12. Стан вологого повітря при температурі $20^\circ C$ визначають за допомогою гігрометра, яким вимірюють температуру точки роси, що дорівнює $10^\circ C$. Визначити відносну вологість φ , вологосміність d і ентальпію h вологого повітря ($p_0 = 745\text{мм. рт. ст.}$).
13. Вологе повітря: $t_{en} = 30^\circ C$, $\varphi_{en} = 80\%$. Визначити параметри вологого повітря: d_{en} , P_n , t_p , абсолютну вологість ρ_n (з таблиці перегрітої пари). Визначити d_{en} аналітично.
14. Вологе повітря: $t_m = 15^\circ C$, $t_c = 35^\circ C$ з даних психрометра. Визначити густину вологого повітря.
15. Для сушіння подається вологе повітря при $t_1 = 20^\circ C$ і $\varphi_1 = 60\%$. У калорифері повітря нагрівається до $t_2 = 95^\circ C$ і потрапляє у сушарню, звідки виходить при $t_3 = 35^\circ C$. Визначити: d_3 , витрату повітря, витрату теплоти у калорифері.
16. У сушарку подається матеріал з початковою температурою



20°C . Кількість теплоти на нагрів матеріалу дорівнює 4 кВт , на витрату у навколошнє середовище 20 кВт . Кількість вологи, що видаляється, 50 кг/год . Визначити співвідношення між приходом і витратою теплоти у сушарці.

17. У сушарку поступає свіже повітря з параметрами $t_c = 13^{\circ}\text{C}$ і $\varphi = 70\%$. Відпрацьоване повітря знаходиться при температурі $t_e = 45^{\circ}\text{C}$ і вологості $\varphi = 70\%$. На сушарку витрачається 40 кг/с повітря. Знайти кількість вологи, що видаляється у сушарці.
18. У сушарці з одноразовим використанням повітря знайти питому витрату повітря і теплоти. Сушка теоретична. Параметри свіжого повітря $t_c = 15^{\circ}\text{C}$ і $\varphi_c = 60\%$, відпрацьованого: $t_e = 50^{\circ}\text{C}$ $\varphi = 50\%$.

Тема 13. Витікання робочого тіла

1. Визначити l_m, W_2 для адіабатного витікання водяної пари при $p_1 = 100 \text{ бар}$, $t_1 = 650^{\circ}\text{C}$, $p_2 = 0,02 \text{ бар}$.
2. Визначити l_m при політропному витіканні N_2 , якщо $n = 1,3$, $t_1 = 1000^{\circ}\text{C}$, $t_2 = 15^{\circ}\text{C}$.
3. Визначити розміри сопла Лаваля для перегрітої пари під кутом розширення 10° , якщо $p_1 = 40 \text{ бар}$, $t_1 = 400^{\circ}\text{C}$, $p_2 = 1 \text{ бар}$, витрата пари 3 м/с .
4. Визначити швидкість витікання водяної пари з сопла першої ступені, якщо в ній використовується 10% від корисного теплоперепаду. $p_1 = 120 \text{ бар}$, $t_1 = 350^{\circ}\text{C}$, $p_2 = 0,01 \text{ бар}$.
5. Знайти швидкість витікання водяної пари з звуженого сопла при $p_1 = 1,5 \text{ МПа}$, $t_1 = 350^{\circ}\text{C}$, $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Яка буде швидкість звуку.
6. Визначити параметри водяної пари перед і за дроселем, якщо $p_1 = 10 \text{ бар}$, $x = 0,9$, $p_2 = 1 \text{ бар}$.
7. Знайти втрату корисного тепло перепаду від дроселювання, якщо $p_1 = 100 \text{ бар}$, $t_1 = 500^{\circ}\text{C}$, $p_1' = 90 \text{ бар}$, $p_2 = 0,05 \text{ бар}$.
8. Знайти витрату повітря через звужене сопло, якщо $p = 100 \text{ бар}$,



$$t = 290^{\circ}C, F_2 = 10 \text{мм}^2.$$

9. Визначити параметри повітря перед соплом, якщо $p_2 = 2 \text{бар}$, $t_2 = 0^{\circ}C$, швидкість витікання 500 м/с .
10. Визначити швидкість звуку у повітрі при $t = 327^{\circ}C, t = 27^{\circ}C$.
11. Водяна пара дроселюється при $p_1 = 10 \text{ МПа}, t_1 = 300^{\circ}C$ до $p_2 = 15 \text{ бар}$. Визначити u, h, s .
12. Водяна пара при $p_1 = 10 \text{ МПа}, t_1 = 625^{\circ}C$ адіабатно витікає через звужене сопло діаметром 6 мм у середовище з $p_2 = 0,5 \text{ бар}$. Визначити параметри пари M_2, W_2 .
13. Повітря при $p_1 = 8 \text{ МПа}$ і $t_1 = 25^{\circ}C$ витікає адіабатно через звужене сопло у середовище з $p_2 = 0,8 \text{ бар}$. Визначити W_2, M_2 , якщо $F_2 = 24 \text{ мм}$.

Змістовий модуль 3. Цикли ТД

Тема 14. П закон термодинаміки

1. У циклі підведене 300 кДж , $\eta_t = 0,48$. Знайти відведене тепло.
2. У циклі отримане $q_0 = 80 \text{ кДж}$, відведене тепло – 35 кДж . Визначити η_t .
3. Визначити η_{tk} , якщо при адіабатному стиску об'єм зменшується у 8 разів. РТ – 1 кг повітря при $t_1 = 20^{\circ}C$.
4. У циклі теплового двигуна з температурами джерел $T_r = 900 \text{ К}$ і $T_x = 300 \text{ К}$ тепловий потік від верхнього джерела – 200 кВт , корисна потужність – 100 кВт . Знайти ККД циклу.
5. Робоче тіло здійснює цикл Корно в інтервалі температур $t_1 = 927^{\circ}C$ та $t_2 = 27^{\circ}C$, виконуючи при цьому роботу 2000 кДж . Знайти Q_2 (кДж).
6. Тіло, температура якого $T_r = 800 \text{ К}$, одержує теплоту від джерела з $T_d = 1000 \text{ К}$, ентропія тіла змінюється на $2,0 \text{ кДж/К}$. Знайти теплоту і зміну ентропії системи (кДж/К).



7. У циклі теплового двигуна з температурами джерела $T_F = 1200\text{K}$ та $T_x = 300\text{K}$ тепловий потік від верхнього джерела дорівнює 100kBt , $\eta_t = 0,32$. Знайти потужність (роботу за секунду) двигуна (kBt).
8. Тепловий двигун працює за циклом Корно при температурах джерела $t_1 = 627^\circ\text{C}$ і $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Кількість підведеній теплоти $q_1 = 700\text{kДж/кг}$. Знайти роботу циклу (кДж/кг).
9. У циклі теплового двигуна з температурами джерела $T_F = 1500\text{K}$, $T_x = 300\text{K}$ корисна потужність дорівнює 150 кВт , тепловий потік до холодного джерела – 50kBt . Знайти η_t циклу.
10. Робоче тіло, що здійснює цикл Корно, $2/3$ теплоти нагрівника Q_1 віддає холодильнику, температура якого $T_2 = 280\text{K}$. Визначити температуру T_1 нагрівника.
11. Робоче тіло здійснює цикл Корно в інтервалі температур $t_1 = 172^\circ\text{C}$ та $t_2 = 327^\circ\text{C}$, виконуючи при цьому роботу 1000kДж . Знайти Q_1 (кДж).
12. У циклі теплового двигуна з температурами джерела $T_F = 1600\text{K}$ $T_x = 400\text{K}$ тепловий потік до нижнього джерела дорівнює 25 кВт , $\eta_t = 0,75$. Знайти корисну потужність (кВт).
13. Тіло з температурою $T_T = 600\text{K}$ одержує теплоту $Q = 1800\text{kДж}$ від джерела з температурою $T_D = 900\text{K}$. Знайти теплоту та зміну ентропії системи (кДж/К).
14. Робоче тіло, що здійснює цикл Корно, від кожної кілокалорії теплоти, що дістас від нагрівника, виконує роботу $L = 598 \text{ Дж}$. Який ККД цього циклу? У скільки разів температура T_1 нагрівника більша від температури T_2 холодильника?
15. Визначити холодильний коефіцієнт зворотнього циклу Корно, якщо температура в холодильній камері -20°C , а в конденсаторі $+40^\circ\text{C}$.



Тема 15. Поршневий компресор

1. Розрахувати ПК, якщо $P_1 = 1$ бар, $P_2 = 150$ бар, $n = 1,25$, $t_{\max} = 170^{\circ}\text{C}$, $V_K = 0,3 \text{ м}^3/\text{с}$, $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$. Робоче тіло – повітря, $c = \text{const}$. Визначити: кількість ступенів, роботу компресора, теоретичну потужність, теплоту охолодження.
2. Визначити потужність компресору при ізотермічному, адіабатному і політропному стиску при $V_K = 1000 \text{ м}^3/\text{год}$, $p_1 = 1$ бар, $x = 8$, $t_1 = 7^{\circ}\text{C}$, $n = 1,15$, РТ – повітря, $c = \text{const}$.
3. Визначити роботу ПК при $x_{\text{за}} = 100$, $n = 1,2$, $p_1 = 1$ бар для одно-, дво-, три- і чотириступеневого ПК.
4. Визначити потужність ідеального компресора з ізотермічним стисненням і годинну кількість теплоти, що передається охолоджувальній воді, якщо $p_1 = 760$ мм. рт. ст., а тиск стисненого повітря $p_2 = 4$ бар. Витрата всмоктуваного повітря $500 \text{ м}^3/\text{год}$.
5. Компресор всмоктує $400 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря при тиску $p_1 = 1$ бар і температурі $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$ і стискає його до тиску $p_2 = 5$ бар. Визначити теоретичну роботу компресора при адіабатному стисненні і температурі повітря після стиснення.
6. Кисневий компресор стискає кисень від $p_1 = 0,98 \cdot 10^5$ Па і $t_1 = 17^{\circ}\text{C}$ до тиску $p_2 = 3,43 \cdot 10^5$ Па. Визначити необхідну потужність двигуна, якщо адіабатний ККД установки $\eta_{\text{ад}} = 0,83$. Продуктивність компресора $200 \text{ м}^3/\text{год}$ стисненого газу.
7. Компресор всмоктує $100 \text{ м}^3/\text{хв}$ водню при температурі 20°C і тиску 1 бар та стискає його до 8 бар. Визначити необхідну потужність двигуна для приводу компресора при адіабатному стисненні, якщо ефективний ККД компресора $\eta_k = 0,7$.
8. Компресор стискає $600 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря при тиску $p_1 = 0,98 \cdot 10^5$ Па до тиску $p_2 = 6,38 \cdot 10^5$ Па. Визначити потужність, необхідну на привід компресора, якщо стиснення відбувається: а) адіабатно; б) політропно (показник політропи



9. Компресор стискує $120\text{m}^3/\text{год}$ повітря при $p_1 = 1 \text{ бар}$ і $t_1 = 27^\circ C$ і стискує його до $p_2 = 12 \text{ бар}$. Визначити: а) температуру стисненого повітря на виході із компресора; б) об'єм стисненого повітря; в) роботу і потужність, що витрачається на стиснення повітря. Розрахунок провести для ізотермічного, адіабатного і політропного стиснення повітря. Показник політропи дорівнює 1,3
10. На вході в циліндр одноступеневого компресора стан повітря характеризується параметрами: $p_1 = 1 \text{ бар}$, $t_1 = 15^\circ C$. Тиск стисненого повітря $p_2 = 6 \text{ бар}$, а температура його $t_2 = 116^\circ C$. Визначити продуктивність компресора (кількість всмоктуваного повітря, $\text{m}^3/\text{год}$), коли відомо, що потужність двигуна, який призначений для приводу компресора, 43,8 кВт, а ефективний ККД $\eta_k = 0,7$.
11. У двоступеневому компресорі без шкідливого об'єму повітря адіабатно стискується від $p_1 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до тиску $p_2 = 49 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Визначити продуктивність компресора, якщо потужність його двигуна 60 кВт, ККД компресора $\eta_k = 0,65$. Початкова температура повітря дорівнює $t_1 = 20^\circ C$.
12. Двоступеневий компресор всмоктує повітря при тиску $p_1 = 1 \text{ бар}$ і температурі $t_1 = 20^\circ C$ і стискує його до кінцевого тиску $p_2 = 40 \text{ бар}$. Між ступенями компресора встановлено проміжний холодильник, у якому повітря охолоджується при сталому тиску до початкової температури. Продуктивність компресора $V_k = 500\text{m}^3/\text{год}$. Визначити теоретичну потужність кожної ступені і кількість теплоти, відведеної від обох ступенів компресора, якщо відомо, що відношення кінцевого тиску до початкового однакове для обох ступені і стиснення відбувається політропно, $n = 1,3$. Відобразити процеси стиснення й охолодження повітря на pv і Ts - діаграмах.
13. Визначити економію роботи, одержану за рахунок переходу від одноступеневого до двоступеневого поршневого компресора без



шкідливого об'єму при адіабатному стисненні повітря. Початковий тиск $p_1 = 0,98 \cdot 10^5$ Па, температура $t_1 = 17^\circ C$. Кінцевий тиск $p_2 = 9,8 \cdot 10^5$ Па.

14. Початкові температури повітря, що надходять у поршневий компресор, такі: $p_1 = 0,98$ бар, $t_1 = 27^\circ C$. Скільки ступенів повинен мати компресор, щоб при адіабатному стисненні максимальна температура повітря в кожному ступені не перевищувала $150^\circ C$. Тиск нагнітання повітря має дорівнювати $p_2 = 20,6$ МПа.
15. Ідеальний поршневий компресор стискує $450 \text{ м}^3/\text{год}$ повітря від $p_1 = 0,98 \cdot 10^5$ Па і $t_1 = 30^\circ C$ до $p_2 = 4,9 \cdot 10^5$ Па. Визначити потужність, витрачену на привід компресора, якщо стиснення відбувається по адіабаті, а також температуру на виході з компресора.

Тема 17. Теоретичні цикли ДВЗ

- Для циклу ДВЗ з змішаним підводом тепла при $p_1 = 100 \frac{\text{kH}}{\text{m}^3}$, $t_1 = 20^\circ C$, $\varepsilon = 15$, $\rho = 1,6$, $\lambda = 1,5$, РТ – повітря при $c = const$ визначити: параметри p, t в характерних точках циклу, корисну роботу, тепло, термічний ККД.
- Розрахувати цикли ДВЗ з змішаним підводом тепла, якщо $\varepsilon = 20$, $\lambda = 1,2$, $\rho = 1,2$, $p_1 = 1$ бар, $t_1 = 5^\circ C$. РТ – повітря, $c = const$.
- ДВЗ з змішаним підводом тепла. РТ – 1 кг повітря $c = const$, $p_1 = 0,8$ бар, $T_1 = 320K$, $\varepsilon = 17$, $\lambda = 1,4$, $\rho = 1,3$. Визначити: $q_1, q_2, q_0, \eta_t, \eta_{tk}$, ступінь термодинамічної досконалості – η_{ot} .
- Побудувати графік залежності η_t ДВЗ при $v = const$ від $\varepsilon = 5, 10, 13$.
- Побудувати графік залежності η_t ДВЗ при $p = const$ від $\varepsilon = 15, 18, 23$.
- В ідеальному ДВЗ з ізохорним підводом теплоти температура



робочого тіла, яке має властивості повітря, при стисненні змінюється від 70 до 350°C . Визначити термічний ККД двигуна, його потужність і питому витрату палива, якщо теплова потужність холодильника 233 кВт. Взяти $Q_n^p = 44,1 \text{ МДж}/\text{кг}$ і $k=1,4$.

7. У циклі поршневого ДВЗ з підведенням теплоти при $v=const$ ступінь стиснення $\varepsilon = 5$, ступінь збільшення тиску $\lambda = 1,5$. Визначити термічний ККД цього циклу, а також циклу Карно, який відбувається за тих самих граничних температур. Робоче тіло – повітря. Теплоємність вважати сталою.
8. В ідеальному циклі ДВЗ з ізобарним підведенням теплоти: $t_1 = 27^{\circ}\text{C}$, $t_3 = 1527^{\circ}\text{C}$; $q_1 = 840 \text{ кДж}/\text{кг}$. Визначити ступінь стиснення і термічний ККД циклу. Робоче тіло – повітря; $k=1,4$.
9. Визначити термічний ККД циклу ДВЗ з ізобарним підведенням теплоти при $\varepsilon = 16$, $\rho = 1,8$, $t_1 = 27^{\circ}\text{C}$, $k=1,4$ і порівняти його з термічним ККД циклу Карно за тих самих граничних температур.
10. Для циклу Дизеля ($p = const$), робоче тіло яке має властивості повітря, задано: $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$; $t_1 = 40^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 14$; $\rho = 1,5$. Визначити параметри чотирьох характерних для циклу точок, термічний ККД і роботу, яку виконує за цикл робоче тіло масою 1кг.
11. Для циклу з підведенням теплоти при $p = const$ визначити параметри у характерних точках, корисну роботу, термічний ККД, кількість підведененої і відведененої теплоти, якщо дано: $p_1 = 1 \text{ бар}$, $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 12,7$; $k = 1,4$. Робоче тіло – повітря. Теплоємність вважати сталою.
12. Для циклу Дизеля, робоче тіло яке має властивості повітря, задані температури, які відповідають таким точкам циклу: $t_1 = 40^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 690^{\circ}\text{C}$; $t_4 = 270^{\circ}\text{C}$. Визначити термічний ККД і порівняти його з термічним ККД циклу Карно в одному й тому самому інтервалі температур.
13. Для циклу ДВЗ з ізобарним підведенням теплоти, визначити температури і тиск у характерних точках, питому корисну роботу, кількість підведененої теплоти і термічний ККД, якщо



дано: $p_1 = 98 \text{ кПа}$; $t_1 = 70^\circ C$; $\varepsilon = 12$; $q_2 = 260 \text{ кДж/кг}$. Робоче тіло – повітря; $k = 1,4$.

Тема 18. Теоретичні цикли ГТУ

- Визначити η_t для ГТУ при $p = const$ і різних $x = 5, 10, 20$. РТ – повітря.
- Розрахувати ГТУ з підводом тепла при $p = const$, якщо $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 20^\circ C$, $x = 6$, $t_3 = 700^\circ C$, РТ – повітря, $c = const$, $V_k = 70 \text{ м}^3/\text{с}$.

Визначити:

- тиск, температуру в характерних точках циклу;
- $l_0, q_0, l_k, l_T, \eta_t$;
- N_0 - турбіни, N_0 - компресору.
- при η_{oi} турбіни і компресора дорівнюють 0,86 визначити дійсні потужності компресора і турбіни. побудувати процеси в $T-S$ діаграмі і розрахувати наявне тепло регенерації.

- Для ГТУ при $P=const$ визначити N_{ef}, η_{ef} , якщо

$$P = 1 \text{ бар}, T_1 = 283 \text{ K}, T_e = 1073 \text{ K}, X = 8, M_{noe} = 40 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

$$\eta_K = 0,8; \eta_T = 0,9; \eta_M = 0,98; C = const.$$

- Для ГТУ при $P=const$ задано: $P_1 = 1 \text{ бар}$; $t_1 = 10^\circ C$; РТ – повітря; $C=const$; $t_3 = 750^\circ C$, $x=6$, $N_{ef}=20 \text{ МВт}$, $\eta_M=0,98$; $\eta_T=0,96$; $\eta_K=0,88$. Визначити: $l_{mex}, l_k, q_0, M_{PT}, M_K$.
- Розрахувати теоретичні цикли ГТУ з підводом тепла при $P=const$, якщо РТ – 1кг повітря, $C=const$, $P_1=1 \text{ бар}$, $T_1=293 \text{ K}$, $x=10$, $T_3=1073 \text{ K}$.

Визначити:

- параметри в характерних точках цикла;
- зобразити цикли в робочій та тепловій діаграмах;
- $l_T, l_k, l_1, q_1, q_2, q_0, l_0$;
- η_t, N_0, N_K .



6. Розрахувати цикли ГТУ з ізобарним підведенням тепла, якщо $P_1=1\text{бар}$, $T_1=300\text{K}$, $T_3=1000\text{K}$, $x=5$, $M=10 \frac{\text{kg}}{\text{c}}$

Визначити:

- параметри в характерних точках циклу;
- l_T, l_k, q_1, q_2 , РТ – 1кг повітря, $C=\text{const}$;
- перевірка $q_0 = l_0$;
- η_t, N_0, N_K ;
- q_p, η_{tp} .

7. У циклі ГТУ з ізобарним підводом тепла відомо: $P_1=1\text{бар}$, $t_1=47^\circ\text{C}$, $t_4=37^\circ\text{C}$, $x=6$, РТ - повітря.

Визначити:

- параметри Р і Т в характерних точках циклу;
- $l_T, l_k, q_1, q_2, q_0 = l_0, \eta_t$;
- побудувати цикли у Р-В і Т-С діаграмах.

8. Розрахувати закриту схему ГТУ з ізобарним підводом тепла, якщо РТ – 1кг повітря, $C=\text{const}$, $P_1=1\text{бар}$, $t_1=15^\circ\text{C}$, $x=6$, $t_3=780^\circ\text{C}$, $k=1,4$.

Визначити:

- параметри в характерних точках циклу;
- l_0, q_0, η_t ;
- побудувати цикли в діаграмах.

Вода охолодження використовується для теплофікації.

Визначити: q_T

9. Розрахувати двоступеневий цикл ГТУ з ізобарним підводом тепла у КЗ, якщо РТ – 1кг повітря, $C=\text{const}$, $P_1=1\text{бар}$, $x_i=5$ в ступенях стиску. Температура в турбіні не менше 800°C .

Визначити:

- Р і Т у характерних точках циклу;
- l_k, q_k, η_t .



10. Розрахувати цикл ГТУ з ізобарним підводом тепла з регенеративним підводом повітря, якщо задані: $P_1=1\text{бар}$, $t_1=17^\circ\text{C}$, $x=6,5$, $t_3=800^\circ\text{C}$, $V_K=0,1\frac{\text{kg}}{\text{c}}$, $\eta_{0i}^T, \eta_{0i}^K=0,89$.

Визначити:

- P і T в характерних точках циклу;
- побудувати Pv - і Ts - діаграми циклу;
- технічну роботу турбіни, компресору;
- підведене і відведене тепло, корисне тепло;
- термічний ККД, тепло регенерації;
- теоретичну і дійсні потужності турбіни, компресору і циклу ГТУ.

Вар.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	5,3	6,2	8,5
Вар.	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
$t_3, ^\circ\text{C}$	600	650	680	700	720	740	760	800	850	620
$V_K, \text{m}^3/\text{c}$	5	0,1	4	0,3	6	0,7	3	6,8	1,1	2

На діаграмах показати підведене і відведене тепло, тепло регенерації, роботу розширення, стиску, корисні роботу і тепло. Зобразити теоретичні і дійсні процеси циклу ГТУ. Показати максимально можливе тепло регенерації. Розрахувати термічний ККД без регенерації. Зробити аналіз.

Тема 20. Теоретичні цикли ХМ

1. Ідеальна парова аміачна холодильна машина працює за циклом Карно в інтервалі температур між $t_{\text{окол}}=-10^\circ\text{C}$ і $t_o=+20^\circ\text{C}$. Визначити теоретичну потужність двигуна холодильної машини, кількість теплоти, відданої охолоджувальній воді в конденсаторі, і годинну кількість аміаку, який прокачують через установку, якщо холодопродуктивність машини $Q=838\text{ МДж/год}$.
2. В аміачній холодильній установці розширювальний циліндр замінено дросельним вентилем. Визначити холодильний коефіцієнт, теоретичну потужність двигуна і годинну витрату аміаку, якщо холодопродуктивність машини



$Q_2 = 419 \text{ МДж/год}$. Температура охолоджуваного простору

$t_{\text{охол}} = -20^\circ \text{C}$, температура середовища $t_{\text{н.с.}} = +20^\circ \text{C}$.

Порівняйте одержані значення ε для схеми з розширювальним циліндром.

3. Аміачна холодильна машина працює при температурі $t_1 = -10^\circ \text{C}$. Пар із випарника виходить сухим насиченим. Температура сконденсованого аміаку знижується внаслідок дроселювання. Визначити холодильний ефект. Представити цикл на Pv - і Ts - діаграмах. Задачу розв'язати за допомогою lgP - h -діаграмами.
4. Компресор аміачної холодильної установки має теоретичну потужність 40 кВт. Із компресора суха насичена пара аміаку при температурі $t_2 = 25^\circ \text{C}$ надходить у конденсатор, після якого рідина у дросельному вентилі розширюється. Температура випаровування аміаку в охолоджувальному середовищі $t_1 = -10^\circ \text{C}$. Визначити холодопродуктивність установки.
5. Теоретична потужність аміачного компресора холодильної установки складає 50 кВт. Температура випаровування аміаку $t_1 = -5^\circ \text{C}$. Із компресора аміачна пара виходить сухою насиченою при температурі $t_o = 25^\circ \text{C}$. Температура рідкого аміаку знижується у дросельному вентилі. Визначити холодопродуктивність 1кг аміаку і годинну холодопродуктивність всієї установки.
6. Холодопродуктивність холодильної установки, тобто кількість теплоти, відібраної від охолоджуваного приміщення, має дорівнювати $q = 1047,5 \text{ МДж/год}$. Температуру охолоджуваного приміщення слід підтримувати такою: $t_{\text{охол}} = -20^\circ \text{C}$; температура навколошнього середовища дорівнює 20°C . Визначити мінімально необхідну теоретичну потужність двигуна холодильної установки. Яка кількість теплоти передається при цьому середовищу протягом години? Яке максимально можливе значення холодильного коефіцієнта? Подати цикл такої холодильної установки на Ts -діаграмі.



7.

- Компресор холодильної установки всмоктує пари фреону-12 при $t_1 = -15^\circ C$, ступінь сухості $x_1 = 0,92$, та адіабатично стискує їх до тиску, за якого його температура $t_2 = 30^\circ C$ і ступінь сухості $x_2 = 1$. Із компресора фреон-12 надходить у конденсатор, де охолоджується водою, яка має температуру на вході $t_{\text{вх}} = 12^\circ C$, а на виході - $t_{\text{вых}} = 27^\circ C$. У дросельному вентилі рідкий фреон-12 дроселюється до стану вологої насиченої пари, далі потрапляє у випарник, після якого ступінь сухості $x_1 = 0,92$. Теплота, необхідна для випаровування фреону-12, підводиться із охолоджувальної камери. Визначити теоретичну потужність двигуна холодильної установки, годинну витрату фреону-12 і охолоджувальної води, якщо холодопродуктивність установки $Q = 209,3 \text{ МДж/год}$.
8. Визначити теоретичну потужність двигуна для приводу теплового насоса, який використовують для опалення приміщення, якщо температура опалювальних радіаторів $t_{\text{нар}} = 50^\circ C$, температура середовища $t_{\text{н.с.}} = -5^\circ C$, а витрата теплоти на опалення складає 418,6 МДж/год.
9. Для опалення приміщень взимку можна використати тепловий насос, що являє собою холодильну установку, в якій навколошне середовище є нижнім джерелом теплоти. У скільки разів більше, за найсприятливіших умов, можна одержати теплоти для опалення приміщень за допомогою теплового насоса, що працює в інтервалі температур між $t_o = -20^\circ C$ і $t_{\text{нар}} = +27^\circ C$ і має двигун потужністю $N = 1 \text{ кВт}$, ніж при електричному опаленні з використанням такої самої потужності.
10. Ідеальна холодильна машина працює за зворотним циклом Карно в інтервалі температур $t_{\text{окол}} = -5^\circ C$ і $t_o = 10^\circ C$. Потужність двигуна $N_{\text{двиг}} = 10 \text{ кВт}$. Визначити, на скільки зменшиться холодильний коефіцієнт і збільшиться необхідна потужність двигуна, якщо для покращення теплопередачі максимальна температура збільшиться на $2^\circ C$, а мінімальна



температура циклу – зменшиться на 2°C . Представити обидва цикли на Ts -діаграмі.

11. Розрахувати детандерну холодильну машину ($Dm-XM$), якщо задано: $P_1 = 1\bar{b}ar$, $t_1 = 10^{\circ}\text{C}$, РТ – 1 кг повітря. С=const.

Визначити:

- параметри (P , T) в характерних точках циклу;
- роботу компресора l_k , детандера l_{dm} , теплоту охолодника;
- q_{oxl} , питому холодопродуктивність - q_2 , витрачену енергію на XM $l_0 = q_0$ (перевірка), ε , ε_k , ε_{ot} ;
- побудувати діаграми циклу XM

12. Розрахувати дросельну холодильну машину ($Dr-XM$), якщо задано: $P_1 = 1\bar{b}ar$, $P_2 = 2\bar{b}ar$, витрати фреону R-12 $M = 0,2 \text{ кг}/\text{c}$, заохолодження і перегрів на 10°C .

Визначити:

- побудувати цикл в діаграмах $lgP - h$, $T-S$;
- l_k , q_k , q_2 , Q_2 (питома і повна холодопродуктивність);
- тепло заохолодження q_{oxl} і перегріву q_{nep} ;
- холодопродуктивність циклу $Dr-XM$ і й циклу Карно(ε , ε_k);
- ступінь термодинамічної досконалості ε_{ot} .

Тема 21. Цикли ПСУ

1. Пара, яка має температуру $t_1 = 530^{\circ}\text{C}$, надходить у турбіну при тиску $P_1 = 50\bar{b}ar$. Після розширення в турбіні температура пари $t_2 = 30^{\circ}\text{C}$.

Визначити:

- 1.Ступінь сухості пари після турбіни.
- 2.Кількість теплоти, підведеній до робочого тіла в котлоагрегаті.
- 3.Кількість теплоти, відведеній у конденсаторі.
- 4.Термічний ККД циклу.
- 5.Ентальпію сухої насиченої пари у процесі підведення теплоти.
- 6.Внутрішню енергію, при якій пара в турбіні стає сухою насиченою.
- 7.Зміну ентропії робочого тіла в процесі пароутворення.



8. Питомий об'єм пари на вході в турбіну.
9. Кількість теплоти, необхідної для нагрівання до кипіння 1 кг води після конденсатора.
10. Відобразити у Ts -координатах цикл ПСУ і теплоту, підведену до робочого тіла у процесі пароутворення
2. На вході в турбіну ПСУ пара має температуру $t_1 = 540^{\circ}\text{C}$. Після розширення в турбіні параметри пари: $x = 0,85$; $P_2 = 0,05\text{бар}$.
- Визначити:
1. Тиск пари на вході в турбіну.
 2. Внутрішню енергію пари на вході в турбіну.
 3. Термічний ККД паросилової установки.
 4. Питому теплоту процесу пароутворення.
 5. Температуру води після конденсатора.
 6. Температуру, за якої пара в турбіні стає сухою насиченою.
 7. Питомий об'єм вологої насиченої пари при пароутворенні, якщо $x = 0,8$.
 8. Зміну ентропії робочого тіла в конденсаторі.
 9. Питому витрату умовного палива.
 10. Ентропію пари після турбіни, якщо її відносний ККД $\eta_{oi} = 0,85$.
11. Відобразити у Ts -координатах теплоту, яка необхідна для нагрівання до кипіння 1 кг води після конденсатора.
3. У пароперегрівнику котлоагрегату суха насичена пара перегрівається від температури $t_6 = 250^{\circ}\text{C}$ до $t_1 = 480^{\circ}\text{C}$. У турбіні пара розширяється до тиску $P_2 = 0,04\text{бар}$.
- Визначити:
1. Ступінь сухості пари після розширення в турбіні.
 2. Кількість теплоти, підведеній до пари в пароперегрівнику.
 3. Кількість теплоти, відведеній від робочого тіла в конденсаторі.
 4. Термічний ККД.
 5. Роботу пари в турбіні.
 6. Зміну внутрішньої енергії пари в турбіні.
 7. Ентропію пари в парогенераторі, якщо питомий об'єм $v_x = 0,04\text{m}^3/\text{kg}$.
 8. Температуру води після конденсатора.



9. Тиск, при якому пара в турбіні стає сухою насыченою.

4. Після турбіни водяна пара має параметри: $t_2 = 50^\circ\text{C}$, $x_2 = 0,85$.

Тиск пари на вході в турбіну $P_1 = 50\text{бар}$. Значення всіх ККД, окрім термічного, дорівнюють одиниці.

Визначити:

1. Температуру пари на вході в турбіну.

2. Ентальпію робочого тіла після конденсатора.

3. Термічний ККД циклу.

4. Внутрішню енергію пари при вході в турбіну.

5. Ентальпію, за якої у процесі підведення теплоти пара стає насыченою зі ступенем сухості $x = 0,2$.

6. Кількість теплоти, необхідної для перегрівання 1 кг сухої насыченої пари до температури t_1 .

7. Пітомий об'єм, який відповідає в турбіні сухій насычений парі.

8. Тиск вологої насыченої пари у конденсаторі.

9. Пітому вагу пари.

10. Температуру насыченої пари, що надходить у пароперегрівник.

11. Відобразити у Pv -координатах цикл ПСУ і позначити роботу циклу.

5. У пароперегрівник котлоагрегату потрапляє суха насычена пара при тиску $P_6 = 20\text{бар}$. Параметри пари після турбіни:

$P_2 = 0,05\text{бар}$, $x_2 = 0,9$.

Визначити:

1. Температуру пари на вході в турбіну.

2. Кількість теплоти, що передається парі у пароперегрівнику.

3. Температуру пари після турбіни.

4. Зміну внутрішньої енергії пари в турбіні.

5. Температуру, за якої пари у турбіні стає сухою насыченою.

6. Пітомий об'єм киплячої води в котлоагрегаті.

7. Теплоту пароутворення.

8. Зміну ентропії робочого тіла в конденсаторі.

9. Роботу, яку виконала у турбіні пара масою 1 кг.

10. Відобразити у Pv -координатах цикл ПСУ і роботу, що виконала у циклі пара масою 1 кг.



6. У котлоагрегат надходить вода під тиском $P_4 = 50\text{бар}$. Тиск пари після турбіни $P_2 = 12\text{kPa}$, його ентальпія $h_2 = 2230\text{кДж/кг}$.

Визначити:

1. Температуру пари перед турбіною.
2. Температуру пари після турбіни.
3. Внутрішню енергію сухої насиченої пари у котлоагрегаті.
4. Питомий об'єм вологої насиченої пари у котлоагрегаті, якщо ступінь сухості $x = 0,2$.
5. Тиск, при якому пара в турбіні стає сухою насиченою.
6. Теплоту, відведену від робочого тіла в конденсаторі.
7. Технічну роботу пари в турбіні.
8. Термічний ККД циклу.
9. Питому витрату пари.
10. Теплоту, підведену до робочого тіла у процесі пароутворення.
11. Відобразити цикл ПСУ у Pv -координатах і позначити роботу циклу.
7. Для ПСУ: $P_1 = 9\text{МПа}$, $T_1 = 823\text{K}$, $P_2 = 50\text{kPa}$. Визначити: η_t , d_0 .
8. Для ПСУ: $P_1 = 4\text{МН/m}^2$, $T_1 = 829\text{K}$, $P_2 = 2\text{МН/m}^2$, $\eta_{0i} = 0.8$. Визначити: h_0 , h_i , при витраті пари $\dot{D} = 50\text{m}/год$ і $\eta_m = 0.98$. Визначити η_{0ef} , N_{ef} , η_t .
9. Для ПСУ: $P_1 = 10\text{МПа}$, $T_1 = 890\text{K}$, $P_2 = 4\text{МПа}$, $\eta_{0i} = 0.8$, $\dot{D} = 400\text{m}/год$, температура води охолодження конденсатора $t'_e = 12^\circ\text{C}$ на вході і на виході на 3°C нижче t_h при P_2 . Визначити: h_0 , h_i , N_i , X_{2g} , M_{oxl} , η_t .
10. Для ПСУ $P_1 = 30\text{бар}$, $t_1 = 430^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,05\text{бар}$. Визначити: η_t , x_2 . Як вони зміняться, якщо $P_1 = 100\text{бар}$?
11. Для ПСУ: $P_1 = 100\text{бар}$, $t_1 = 430^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,05\text{бар}$. Визначити: η_t , x_2 . Як вони зміняться, якщо $T_1 = 883 \text{ K}$.
12. Для ПСУ: $P_1 = 100\text{бар}$, $t_1 = 510^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,04\text{бар}$. Визначити:



η_t, x_2 . Як вони зміняться, якщо $P_2 = 0,8\text{бар}$?

13. Визначити витрату пари Δ для ПСУ при $N_{el} = 100MBm$.

$$P_1 = 100\text{бар}, t_1 = 500^\circ C, P_2 = 0,03\text{бар}, \eta_{0el} = 0,86, \eta_m = 0,98.$$

14. Для ПСУ: $P_1 = 30\text{бар}, P_2 = 0,04\text{бар}, \eta_t = 0,97, \eta_{0i} = 0,86, \eta_m = 0,98$, вологість за турбіною 0,1. Визначити: t_1 , Δ , а також В палива, якщо $\eta_{pp} = 0,9, Q_n^p = 34MДж/m^3$.

15. Для ТЕЦ: $P_1 = 80\text{бар}, t_1 = 460^\circ C, P_2 = 4,5\text{бар}, P_2 = 0,5\text{бар}, \eta_{0i} = 0,85; \eta_m = \eta_t = 0,98$. Витрата тепла на виробництво $Q_T = 10MBm$, на опалення $Q_{on} = 20MBm$. Температура конденсату після технологічних процесів $60^\circ C$, після опалення $30^\circ C$. Визначити N_{el} , коефіцієнт використання тепла К. Відобразити процеси в $h-S$ діаграмі, надати схему ТЕЦ.

16. Для ПСУ: $P_1 = 120\text{бар}, t_1 = 550^\circ C, P_2 = 0,03\text{бар}$. Визначити: η_{tp} , якщо ПСУ з 3 регенеративними відборами поверхневого типу: $P_{e1} = 4\text{бар}, P_{e2} = 1,2\text{бар}, P_{e3} = 0,8\text{бар}$. Визначити η_t без регенерації. Відобразити процеси в $h-S$ діаграмі, надати схему ПСУ.

17. Для ПСУ з трьома РП змішуючого типу: $P_1 = 80\text{бар}, t_1 = 450^\circ C, P_2 = 0,05\text{бар}$. Визначити η_{tp} , якщо $P_{e1} = 5\text{бар}, P_{e2} = 2\text{бар}, P_{e3} = 0,7\text{бар}$, а також η_t без регенерації. Відобразити процеси в $h-S$ діаграмі, надати схему ПСУ.

18. Для ПСУ: $P_1 = 100\text{бар}, t_1 = 550^\circ C, P_2 = 0,02\text{бар}$. Визначити η_t, x_2, d_c . Як зміняться ці характеристики, якщо ввести промперегрів $P_{en} = 10\text{бар}$.

19. Для ПСУ: з двома поверхневими РП: $P_1 = 80\text{бар}, t_1 = 550^\circ C, P_2 = 0,01\text{бар}, P_{e1} = 8\text{бар}, P_{e2} = 1\text{бар}$. Визначити η_{tp} і η_t без регенерації. Відобразити процеси в hS -діаграмі, надати схему ПСУ. Як зміниться ККД, якщо поверхневі РП замінити змішуючими РП?



20. Для ПСУ: $P_1 = 80 \text{бар}$, $t_1 = 550^\circ C$, $P_2 = 0,05 \text{бар}$. Визначити η_t .

Як зміниться η_t , якщо $P_2 = 7 \text{бар}$?

21. Для ПСУ: $P_1 = 10 \text{МПа}$, $t_1 = 600^\circ C$, $P_2 = 0,03 \text{бар}$. Визначити η_t і термічний ККД з граничною регенерацією тепла.

22. Для ПСУ: $P_1 = 30 \text{бар}$, $P_2 = 0,2 \text{бар}$, $x_2 = 0,95$. Представити схему ПСУ, $T-S$ діаграму процесів, $h-S$ діаграму. Визначити η_t , $q_{\text{в/е}}$, $q_{\text{екранів}}$, $q_{\text{перегріву}}$, q_1 , q_2 , q_0 .

23. Визначити витрату умовного палива для ПСУ: $N_{el} = 100 \text{МВт}$, $\eta_{el} = 0,43$, $\eta_{ne} = 0,9$.

24. Для промислової ПСУ: $P_1 = 28 \text{бар}$, $T_1 = 670^\circ K$, $D = 10 \text{кг/с}$, $\eta_{el} = 0,8$, $P_2 = 0,16 \text{бар}$.

Визначити:

- N_{el} , η_t ;

- на скільки зросте N_{el} , η_t , якщо після реконструкції $P_1 = 35 \text{бар}$, $T_1 = 710^\circ K$.

25. Для ПСУ: $P_1 = 36 \text{бар}$, $T_1 = 710^\circ K$, $P_2 = 0,03 \text{бар}$, $N_0 = 8 \text{МВт}$, $\eta_{\text{ПР}} = 0,9$, $Q_n^p = 29 \text{МДж/кг}$. Визначити витрату палива В.

26. Для ТЕЦ в турбіні Р(протискові): $P_1 = 40 \text{бар}$, $t_1 = 450^\circ C$, $P_2 = 7 \text{бар}$, $t'_{\text{ме}} = 150^\circ C$, $t''_{\text{ме}} = 70^\circ C$. Визначити: η_t , N_0 , Q_{on} , K , $M_{\text{ме}}$ (витрату мережової води якщо $\eta_{mn} = 0,98$).

27. Для ТЕЦ з турбінами ТП(з теплофікаційним і промисловим відборами): $P_1 = 80 \text{бар}$, $t_1 = 500^\circ C$, $P_2 = 0,05 \text{бар}$, $P_{bm} = 7 \text{бар}$, $P_{bn} = 15 \text{бар}$, $Q_T = 20 \text{МВт}$, $Q_n = 15 \text{МВт}$, $t_{km} = 50^\circ C$, $t_{kn} = 60^\circ C$.

Визначити: $D_{\text{ПР}}$, якщо $N_0 = 400 \text{МВт}$, D_T , $D_{\text{П}}$, К-коофіцієнт використання тепла.

28. Для центральної котельні: $P_1 = 14 \text{бар}$, $Q_{on} = 50 \text{МВт}$, парові



котли $\mathcal{D}_K = 25 \text{м}^2/\text{год}$, паливо вугілля $Q_n^p = 29 \text{МДж}/\text{кг}$,

$\eta_k = 0,88$. Визначити: кількість котлів, витрату палива на один котел і на котельню, витрату насиченої пари на мережевий підігрівач, якщо промисловий відбір пари складає $Q_T = 10 \text{МВт}$, температура мережової води $t'_{\text{мв}} = 150^\circ\text{C}$ і зворотна $t''_{\text{мв}} = 70^\circ\text{C}$, а також визначити витрату мережової води M_{MB} . Який буде загальний ККД котельні, якщо втрати на власні потреби 10%.

29. Визначити для ПСУ: η_t , \mathcal{D} , d_0 , якщо $N_0 = 250 \text{МВт}$, $P_1 = 90 \text{бар}$, $t_1 = 500^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,05 \text{бар}$.
30. Для ПСУ з одним поверхневим РП: $P_1 = 35 \text{бар}$, $t_1 = 410^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,04 \text{бар}$, $P_e = 1,2 \text{бар}$. Визначити $\mathcal{D}_{\text{відбору}}$, η_t .
31. Визначити тиск відбору на вторинний перегрів для ПСУ: $P_1 = 90 \text{бар}$, $t_1 = 500^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,04 \text{бар}$. Визначити x_2 і η_t .
32. Визначити частки відбору пари на три змішуючі РП, якщо $P_1 = 80 \text{бар}$, $t_1 = 450^\circ\text{C}$,
 $P_2 = 0,05 \text{бар}$, $P_{e1} = 1,2 \text{бар}$, $P_{e2} = 7 \text{бар}$, $P_{e3} = 2 \text{бар}$.
33. Знайти загальний ККД ПСУ, якщо $P_1 = 50 \text{бар}$, $t_1 = 400^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,05 \text{бар}$, $\eta_{\text{ПР}} = 0,9$, $\eta_{0i} = 0,88$, $\eta_m = \eta_\Gamma = 0,98$.
34. Знайти абсолютний ефективний ККД ПСУ, якщо $P_1 = 40 \text{бар}$, $t_1 = 440^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,07 \text{бар}$, $\eta_{0i} = 0,85$, $\eta_m = \eta_\Gamma = 0,98$.
35. Знайти абсолютний внутрішній ККД ПСУ, якщо $P_1 = 80 \text{бар}$, $t_1 = 440^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,16 \text{бар}$, $\eta_{0i} = 0,85$.
36. Визначити теоретичну потужність ПСУ, якщо $P_1 = 50 \text{бар}$, $t_1 = 500^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,16 \text{бар}$, $\mathcal{D} = 20 \text{кг}/\text{с}$.
37. Визначити внутрішню потужність ПСУ, якщо $P_1 = 90 \text{бар}$, $t_1 = 510^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,02 \text{бар}$, $\mathcal{D} = 45 \text{кг}/\text{с}$, $\eta_{0i} = 0,88$.
38. Визначити ефективну потужність ПСУ, якщо $P_1 = 70 \text{бар}$, $t_1 = 600^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,04 \text{бар}$, $\mathcal{D} = 100 \text{кг}/\text{с}$, $\eta_m = 0,9$, $\eta_{0i} = 0,85$.



39. Визначити електричну потужність ПСУ, якщо $P_1 = 100 \text{бар}$,
 $t_1 = 700^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,01 \text{бар}$, $\Delta = 80 \text{kг/с}$, $\eta_{0i} = 0,85$,
 $\eta_m = \eta_r = 0,99$.
40. Визначити ексергію тепла для палива, якщо $Q_n^P = 32 MДж/кг$,
 $t_{\text{зопіння}} = 1900^\circ\text{C}$, $t_{\text{середовища}} = 20^\circ\text{C}$.
41. Визначити ексергію водяної пари, якщо $Q_n^P = 30 MДж/кг$,
 $t_\Pi = 500^\circ\text{C}$, $t_{\text{середовища}} = 20^\circ\text{C}$, тиск пари $P_\Pi = 80 \text{бар}$.
42. Визначити ексергію живильної води на вході в ПГ, якщо
 $t_{\text{ЖВ}} = 120^\circ\text{C}$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$.
43. Визначити ексергетичний ККД ПГ, якщо $P_1 = 80 \text{бар}$,
 $t_1 = 500^\circ\text{C}$, $Q_n^P = 28 MДж/кг$, $t_{\text{зопіння}} = 1900^\circ\text{C}$, $t_0 = 10^\circ\text{C}$,
 $t_{\text{ЖВ}} = 180^\circ\text{C}$.
44. Визначити ексергетичний ККД турбогенератора, якщо
 $P_1 = 100 \text{бар}$, $t_1 = 600^\circ\text{C}$, $t_0 = 15^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,04 \text{бар}$, $\eta_{0i} = 0,85$,
 $N_{el} = 200 MВт$, $\Delta = 80 \text{kг/с}$.
45. Визначити ексергетичний ККД конденсату турбіни, якщо
 $P_1 = 90 \text{бар}$, $t_1 = 510^\circ\text{C}$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_2 = 0,04 \text{бар}$, $\eta_{0i} = 0,9$.

7. Контрольні тести

Змістовий модуль 1. Термодинаміка газового РТ

Тема 1. Параметри стану РТ

- Яка величина характеризує підвід тепла? (h , t , s , v)
- Коли термодинамічна система ізольована?
- Знак роботи зміни об'єму визначає (u , s , t , v).
- Знак технічної роботи визначає: P , v , t , s .
- Яка величина є повний диференціал? (Pdv , vdp , cDT , Tds)
- Який тиск є параметром стану? (атмосферний, надлишковий, абсолютний, розрідження)
- Маса газу при T , ρ стала зростає у два рази при: збільшенні тиску в 2 рази, зменшенні тиску в 2 рази, зменшенні у $\sqrt{2}$,



8. Ідеальний газ, газ у якому нехтуємо:

- об'ємом молекул;
- силами взаємодії між молекулами;
- обертальних рухом молекул;
- об'ємом молекули і силами взаємодії.

9. Якому рівнянню відповідає закон Бойля-Маріотта?

$$\left(\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}; \frac{P_1}{P_2} = \frac{v_1}{v_2}; \frac{P_1}{P_2} = \frac{v_2}{v_1}; \frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \right).$$

10. Яку властивість має внутрішня енергія?

- залежить від P і не залежить від v;
- залежить від v і T;
- залежить від P і T;
- залежить від P і v.

11. Переведіть $6\text{ кг}/\text{см}^2$ в бар, МПа, Па, мм.рт.ст.

12. Який тиск більше?

$$5\text{ г}/\text{мм}^2, 2\text{ кг}/\text{м}^2, 2 \text{ бар}.$$

13. Чому відповідає 1бар, 1ат, 1Ат?

$$(760 \text{ мм.рт.ст.}, 750 \text{ мм.рт.ст.}, 735,6 \text{ мм.рт.ст.}).$$

14. Яка величина залежить від характеру процесу?

$$(q, t, l, s, u, P, v, h).$$

15. Який параметр характеризує повну енергію РТ?

$$(T, s, u, h, q).$$

Тема 2. Теплофізичні характеристики РТ

1. Чому дорівнює об'єм 1кмолью при нормальних фізичних умовах?
(12,5; 21; 22,4; 24.).

2. Який тиск (температура) при нормальних фізичних умовах?

$$[750(20^\circ C); 735,6(0^\circ C); 760(0^\circ C)].$$

3. Чому дорівнює універсальна газова стала?
(4,157; 4,19; 8,314).

4. Чому дорівнює ізохорна мольна теплоємність при нормальних фізичних умовах?

$$(4,157 \cdot i; 4,19 \cdot i; 8,314 \cdot i).$$

5. Запишіть рівняння Майєра через масову, мольну, і об'ємну теплоємність.



6. Який газовий закон використовують для приведення газу до нормальних фізичних умов?

- Бойля-Маріота;
- Шарля;
- Гей-Люссака;
- Авогадро;
- об'ємний закон Б-М і Г-Л.

7. Яка залежність відповідає дійсності?

$$\left(\frac{\mu_2}{\mu_i} = \frac{v_2}{v_1}; \frac{\mu_i}{\mu_2} = \frac{R_1}{R_2}; \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{c_2}{c_1} \right).$$

8. Яка залежність відповідає дійсності?

$$\left(\frac{\mu_i}{\mu_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}; \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{R_1}{R_2}; \frac{\mu_3}{\mu_2} = \frac{c_2}{c_1} \right).$$

9. Чому дорівнює теплоємність в ізотермічному процесі?
(0; ∞ ; 1).

10. Чи однакова теплоємність μc_p при $t = 50^\circ C$ для N_2 , O_2 , CO?

11. Яка нерівність вірна?
($0 < c_p < c_v; c_p > c_v > 0; c_v < 0 < c_p; c_p < c_v < 0$).

Тема 3. Газові суміші

1. Які рівняння відповідають дійсності?

$$(V_c = \sum_i^n V_i; R_c = \sum_i^n R_i; \mu_c = \sum_i^n \mu_i).$$

2. Які рівняння відповідають дійсності?

$$(P_c = \sum_i^n P_i; P_c = \sum_i^n r_i P_i; P_c = \sum_i^n g_i P_i).$$

3. Парціальний тиск P_i компонентів газової суміші визначаються при: $T_c, V_i; R_c, V_c; V_c, T_c$.

4. Зведений об'єм V_c компонентів газової суміші визначаються при:
 $P_c, T_c; R_c, T_c; T_c, V_c$.

5. Які рівняння записані вірно?



$$(R_c V_c = V_i R_i; P V_c = P_c V_i; P_c V_c = P_i V_i).$$

6. Які частки компонентів газової суміші однакові: масові \ddot{a} ,

об'ємні r_i , мольні m_i

7. Які співвідношення записані вірно?

$$\left(\frac{v_i}{v_c} \ddot{a} = \frac{\rho_c}{\rho_i} \ddot{a}; \frac{v_i}{v_c} \ddot{a} = \frac{\mu_i}{\mu_c} \ddot{a}; \frac{v_i}{v_c} \ddot{a} = \frac{R_c}{R_i} \ddot{a} \right).$$

8. Які співвідношення записані вірно?

$$\left(\frac{\mu_c}{\mu_i} \ddot{a} = \frac{\rho_s}{\rho_{\tilde{n}}} \ddot{a}; \frac{\mu_c}{\mu_i} \ddot{a} = \frac{c_i}{c_c} \ddot{a}; \frac{\mu_c}{\mu_i} \ddot{a} = \frac{v_c}{v_i} \ddot{a} \right).$$

9. Які рівняння записані вірно?

$$(c_c = \sum_i^n c_i; c_c = \sum_i^n q_i c_i; c'_c = \sum_i^n q_i c'_i; c'_c = \sum_i^n r_i c'_i).$$

10. Об'ємна частка O_2 у повітрі 21%. Чому дорівнює масова частка N_2 ? (79; 77; 81; 76).

11. Який закон встановлює зв'язок між P_i і P_c ?

(Авогадро; Шарля; Дальтона; Гей-Люссака).

12. $R_c = 900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ для суміші з H_2 і N_2 . Яка масова частка H_2 ? (0,844; 0,233; 0,156; 0,767).

Тема 4. Перший закон термодинаміки

1. Визначити $\Delta T / \Delta S$ для газу, якщо $\Delta T / \Delta S_v = 0,5$,

$\mu c_v = 28 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль}}$. (0,211; 0,352; 0,711; 0,5).

2. Визначити відстань по горизонталі ΔS між ізохорами в Ts -діаграмі.

$$\left(\Delta s = R \ln \frac{v_2}{v_1}; \Delta s = c_V \ln \frac{v_1}{v_2}; \Delta s = c_V \ln \frac{v_2}{v_1}; \Delta s = c_P \ln \frac{v_1}{v_2} \right).$$

3. Чому дорівнює 1 ккал?

(4,19 кДж; 4,157 кДж; 427 кгм; 9,81 Дж).

4. Чому дорівнює 1 Дж? ($H \cdot c$; $H \cdot m$; H/m ; $\frac{H}{m}$).



5. Чому дорівнює 1кВт? ($\kappa \Delta \text{ж} \cdot c$; $\frac{\kappa \Delta \text{ж}}{год}$; $\frac{\kappa \Delta \text{ж}}{c}$; $\kappa \Delta \text{ж} \cdot год$).
6. Чому дорівнює 1кВтг? (1,36кс; 632ккал; 860ккал; 75 кгм/с).
7. Які рівняння визначають тепло? (cdT ; Pdv ; vdP ; Tds).
8. Від яких величин не залежить робота, тепло?
(P ; v ; T ; характеру процесу).
9. Які рівняння відповідають першому закону термодинаміки?
($\partial q = du + \partial l$; $\partial q = dh + vdP$; $\partial q = dh + WdW$).
10. При збільшенні ентропії s , як зміниться температура?
11. При збільшенні T , тепло підводиться чи відводиться?
12. При стиску газу температура може зменшуватись?

Тема 5. Газові процеси

1. У якому процесі $q = \Delta h$?
2. При якому Р відбувається самозаймання суміші повітря і бензину при адіабатному стиску, якщо $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 135^\circ \text{C}$, $t_C = 550^\circ \text{C}$, $k = 1,385$.
(15,7; 1,25; 0,7; 0,637 МПа)
3. $V_e = 0,05 \text{ м}^3$ при $P_e = 0,1 \text{ МПа}$, стискається при $t=const$ до $\frac{V_{\tilde{a}}}{2}$.
Визначити q , кДж. (3,47; -3,47; -34,7; -1,73).
4. Газ у балоні при $P_{1,man} = 0,02 \text{ МПа}$ і $t_1 = 400^\circ \text{C}$ охолоджується до $P_{2,man} = 0,03 \text{ МПа}$. $B = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити t_2 , $^\circ \text{C}$.
(233; 176; 120; 267)
5. Повітря в циліндрах при $t_1 = 40^\circ \text{C}$, $V_1 = 0,1 \text{ м}^3$ нагрівається до $t_2 = 40^\circ \text{C}$ при $P=const$. Для циліндра $0,4 \text{ м}^3$ знайти переміщення поршня(м). (1,59; 0,21; 0,11; 0,85).
6. Газ розширюється по закону $vP^{-0,5}$. Якого знаку q і C ?
[(+q, +c); (-q, -c); (+q, -c); (-q, +c)].
7. У політропному процесі $Pv^{2,2}$ підводиться q. Як зміниться l , Δu ?
[(+l, + Δu); (-l, - Δu); (+l, - Δu); (-l, + Δu)].
8. Газ розширюється при $Pv^{0,7}$. Як змінюються q , Δu ?
[(+q, + Δu); (-q, - Δu); (+q, - Δu); (-q, + Δu)].



9. Як змінюються k з збільшенням T газу?
($k=const$, k -зростає, k -зменшується).
10. В ізобарному і адіабатному процесах температури у початковому і кінцевому стані однакові. Чому дорівнює $\frac{l_p}{l_s}$?
- ($k; \frac{1}{k}; k-1; \frac{1}{k}-1$).
11. Коли $l = l_t$?
12. У яком процесі $l = -\Delta u$; $l_t = \Delta h$?
13. У яких процесах теплоємність від'ємна? Чому?
14. У всіх газових процесах яка величина стала?
15. Чому в $T-s$ діаграмі ізохора та ізобара не співпадають?
16. Коли технічна робота від'ємна і додатня?
17. На яку величину Δh більша Δu ?
18. Зобразити процеси з підводом тепла в $P-V$ діаграмі.
19. Зобразити процеси розширення в тепловій діаграмі.
20. Зобразити процеси охолодження в робочій діаграмі.
21. Зобразити процеси стиску в тепловій діаграмі.
22. У тепловій діаграмі покажіть c_p, c_v, R .
23. У тепловій діаграмі покажіть площину ентальпії; різницю ентальпій.
24. У тепловій діаграмі покажіть площини $l, l_t, \Delta u, \Delta h$.

Змістовий модуль 2. Термодинаміка реального PT

Тема 7. Диференціальні рівняння термодинаміки

1. Потрібно експериментально визначити залежність $s(v)_T$. Відомо, що заміряти s неможливо. Для цього можливо заміряти $[P(T)_v; P(T)_S; v(P)_T; v(T)_P]$.
2. Як заміряти $P(s)_v$? Експериментально можливо заміряти:
 $[P(T)_v; T(v)_S; T(P)_S; v(T)_P]$.
3. Як заміряти $s(P)_T$? Експериментально можливо заміряти:
 $[P(T)_v; T(v)_S; T(P)_S; v(T)_P]$.
4. Як заміряти $v(s)_P$? Експериментально шляхом заміру:



5. Які часткові похідні дорівнюють між собою?

$$\left[\left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v, \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_v; \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v, \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T; \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v, \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_P; \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_P, \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_v \right].$$

6. Яке сполучення параметрів характеризує U?

$$[f(v, s); f(P, s); f(v, T); f(P, T)].$$

7. Яке сполучення параметрів характеризує h?

$$[f(v, s); f(P, s); f(v, T); f(P, T)].$$

8. Яке сполучення параметрів характеризує F?

$$[f(v, s); f(P, s); f(v, T); f(P, T)].$$

9. Яке сполучення параметрів характеризує ψ ?

$$[f(v, s); f(P, s); f(v, T); f(P, T)].$$

10. Зобразити вільну енергію Ts -діаграмі.

11. Зобразити вільну ентальпію в Ts -діаграмі.

12. Зобразити u , h Ts -діаграмі.

13. Які енергетичні параметри ОК дорівнюють 0.

14. Які співвідношення відповідають дійсності:

$$\left[\left(\frac{\partial I}{\partial I} \right)_{P,s} = \left(\frac{\partial F}{\partial M} \right)_{V,T} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial M} \right)_{P,T} = \left(\frac{\partial U}{\partial M} \right)_{V,s} = \psi \right].$$

15. Скільки ступенів вільності має вода, кипляча вода?

16. Скільки ступенів вільності має волога пара, суха насычена пара, перегріта пара?

Тема 8. Водяна пара

1. Як залежить t_h від P ?

2. Коли $r=0$?

3. Параметри критичної точки?

4. Параметри потрійної точки?

5. Як визначити h води, або киплячої води?

6. Як визначити v_x ?

7. Як визначити h_x ?

8. Як визначити s_x ?



9. Як визначити u_x ?

10. Зображення h_x в тепловій діаграмі.
11. Зображення h' в тепловій діаграмі.
12. Зображення h'' в тепловій діаграмі.
13. Зображення q_{nep} в тепловій діаграмі.
14. Як визначити s води?
15. Як визначити s' води?
16. Як визначити s'' води?
17. Чому на ділянці вологої пари ізобара і ізотерма прямі лінії?
18. Чому на ділянці вологої пари ізохори криві лінії?
19. Чому ізотерма відхиляється полого вправо на ділянці перегрітої пари?
20. Чому ізохора крутіше ніж ізотерма?
21. Чи може СНП ізохорно охолоджуватись до конденсації?
22. Чи можливо у ізохорному нагріві вологу пару перетворити у воду?
23. Чи можливо охолоджувати воду до перетворення її у вологу пару в ізохорному процесі?
24. Чи можливо адіабатно розширювати воду до перетворення її і вологу пару?
25. Чи може вода закипати при $0^\circ C$?
26. Чи може вода нагріта до $300^\circ C$ не закипіти?
27. Чи може вода нагріта до t_n миттєво перетворитись у пару?

Тема 11. Вологе повітря

1. Чому вологість у повітрі знаходиться у перегрітому стані?
2. Коли виникає туман, роса?
3. Чи можна вологе повітря приймати за газ і використовувати для нього закон ідеальних газів?
4. Що таке t_n ?
5. Що таке абсолютна вологість?
6. Що таке відносна вологість?
7. Що таке вологість?
8. Якими процесами можливо охолоджувати повітря?
9. Що важить більше сухе чи вологе повітря?



10. Теплоємність вологого повітря більша, ніж сухого?
11. Який процес охолодження і нагріву вологого повітря?
12. Як вимірюється сухе і вологе повітря?
13. Що означає $\varphi = 90\%$, чи можливо $\varphi = 100\%$?
14. Що відбувається з повітрям при $t=100^\circ C$?
15. Який об'єм займає 1kg сухого повітря при нормальнích фізичних умовах?
16. Скільки важить $1 m^3$ сухого повітря при нормальнích фізичних умовах?
17. Чому ізоентальпії в *hd*-діаграмі проведені під кутом 135° ?
18. Чому процес сушіння відбувається при $h=const$?

Тема 13. Витікання РТ

1. СНП при $P_1 = 1 MPa$ витікає через звужене сопло в середовище з $P_2 = 0,1 MPa$. Які зміни відбудуться, якщо встановити сопло Лаваля?
2. Як змінюються v , s при дроселюванні?
3. В соплах за рахунок чого зростає швидкість?
4. Що означає паливна робота чи витікання?
5. Як можна використати паливну роботу?
6. Чи завжди у соплах зростає швидкість?
7. Чому дорівнює критичне співвідношення тисків?
 $(0,7 \div 0,8; 0,5 \div 0,55; 0,3 \div 0,4)$.
8. Яка швидкість газу буде при β_{kp} ?
9. Що відбудеться при встановлені звуженого сопла при β_{kp} ?
10. Чи може бути $W_2 > C_{\infty}$ і коли?
11. Чому при дроселювання швидкість потоку РТ не зростає?
12. Ентальпія при дроселюванні збільшується, зменшується, чи залишається сталою?
13. Коли температура при дроселюванні зменшується?
14. Коли температура РТ при дроселюванні зростає?
15. Як змінюється Р і v при дроселюванні?



Тема 14. II закон термодинаміки

1. Пряний цикл. Коли розширення і стиск співпадають, коли розширення вище стиску, коли розширення нижче стиску.
2. Як впливає нерівноважність, необерталльність на ККД циклу?
3. Коли зростає ентропія за цикл, коли не змінюється, коли зменшується?
4. Який ККД може бути реалізований у циклі ТД при $\Delta T = T_2 - T_1 = 220 + 20(K)$: [1; 0,36; 0,38; 0,42; 0,46].
5. Чи може бути корисне тепло за цикл від'ємним?
6. В циклі $q_0 = l_0$; $q_0 \neq l_0$; $q_0 > l_0$; $q_0 < l_0$?
7. Термічний ККД $\left[\eta_t = \frac{q_0}{q_1}; \eta_t = \frac{q_1}{q_2}; \eta_t = \frac{q_2}{q_1}; \eta_t = \frac{l_1}{q_1} \right]$.
8. Зміна внутрішньої енергії за цикл: $\Delta u = 0$; $\Delta u > 0$; $\Delta u < 0$.
9. Коли за цикл: $\Delta s = 0$; $\Delta s > 0$; $\Delta s < 0$.
10. Для здійснення циклу ТД достатньо мати два джерела тепла: «гаряче» і «холодне»?
11. Коли $\eta_t = 1$ для цикла ТД?
12. ККД циклу з граничною регенерацією $[\eta_{tp} = \eta_{tk}; \eta_{tp} > \eta_{tk}; \eta_{tp} < \eta_{tk}]$.
13. Чому $\eta_t < \eta_{tk}$?

Тема 15, 16. Поршневий компресор

1. У якому процесі стиску буде I_K мінімальний?
 - адіабатний стиск;
 - стиск при $k > n > 1$;
 - стиск при $n > k$;
 - ізотермічний стиск.



2. Як змінюється I_K при збільшенні кількості ступенів ПК:

- збільшується;
- зменшується;
- не змінюється;
- покаже розрахунок.

3. Призначення ПК:

- збільшити Р;
- забезпечити подачу газу;
- наповнити балон газом.

4. Яке значення n для ПК з охолодженням?

$$[n > 1; n < 1; 1 < n < k; n > k].$$

5. При якому n працюють ПК без охолодження?

$$[n > 1; n < 1; 1 < n < k; n > k].$$

6. Як зменшити I_K ?

7. При стиску газу температура в ПК з охолодженням:

- зменшується;
- збільшується;
- стала.

8. ККД ПК зростає зі збільшенням x ?

9. Чи є обмеження у зростанні x ?

10.Що характеризує ізотермічний ККД ПК?

11. Для чого вводиться охолодження ПК?

12. Для чого використовують багатоступеневі ПК?

13. Де встановлюється охолодження ПК?

14. Ступінь стиску у ступені залежить від кількості ступенів?

15. Теоретична потужність ПК дорівнює потужності двигуна для приводу ПК?

Тема 17. Теоретичні цикли ДВЗ

1. Який цикл ДВЗ кращий при одинакових ε ?

$$[\eta_t^p > \eta_t^V > \eta_t^{p,V}; \eta_t^V > \eta_t^{V,p} > \eta_t^p; \eta_t^{p,V} > \eta_t^p > \eta_t^V].$$

2. Який цикл ДВЗ кращий при одинаковому максимальному тиску у циліндрі?

$$[\eta_t^{V,p} > \eta_t^p > \eta_t^V; \eta_t^V > \eta_t^{V,p} > \eta_t^p; \eta_t^p > \eta_t^{p,V} > \eta_t^V].$$



3. Як залежить η_t від ε ? [$\eta_t > ; \eta_t < ; \eta_t$ не змінюється].
4. Який цикл ДВЗ кращий при однаковій ε , T_{\max} ?
 $[\eta_t^V > \eta_t^p ; \eta_t^V = \eta_t^p ; \eta_t^{p,V} > \eta_t^p > \eta_t^V]$.
5. Що всмоктується у циклі з ізохорним підводом тепла?
6. Що всмоктується у циклі з ізобарним підводом тепла?
7. У якому ДВЗ більше ε ?
8. За скільки обертів валу здійснюється цикл ДВЗ?
9. У яких циклах використовуються свічки, форсунки?
10. При стиску РТ у ДВЗ температура повинна бути менш, або більш t_C палива?
11. Чим відрізняється цикл Отто від циклу Дізеля?
12. Від чого залежить η_t ?
13. Коли підвід тепла здійснюється при $v = const$, при $p = const$, або при v і $p = const$?
14. Які найбільші втрати енергії палива в ДВЗ?
[$\Delta Q_3 ; Q_2 ; \Delta N_l ; \Delta N_M$].
15. Які втрати включає Q_2 ?
16. Пояснити технічні характеристики ДВЗ: $\varepsilon, \lambda, \rho$.

Тема 18, 19. Теоретичні цикли ГТУ

1. Переваги ГТУ порівняно з ДВЗ.
2. Як змінюється тиск на робочих лопатках активної ступені турбіни?
3. Як змінюється тиск на робочих лопатках реактивної ступені турбіни?
4. Яка швидкість зростає на робочих лопатках реактивної ступені турбіни?
5. Чому не використовується ГТУ з ізохорним підводом тепла?
6. Звідки подається енергія на привід компресора ГТУ?
7. Яке спiввiдношення вiрне?
[$l_T - l_K = q_1 - q_2 ; l_T - l_K > q_1 - q_2 ; l_T - l_K < q_1 - q_2$].



8. Чому обмежується T_3 ?
9. Як впливає ступінь стиску компресора x на показники ГТУ?
 $(>\eta_t i > t_3); (>\eta_t i < t_3); (<\eta_t i < t_3); (<\eta_t i > t_3).$
10. На що витрачається N_0 ?
11. Які втрати включає O_2 ?
12. З чого складається загальний ККД ГТУ?
13. Що характеризує η_{K3} ?
14. Що характеризує η_t ?
15. Що характеризує η_{oi} ?
16. Що характеризує η_M ?
17. Що характеризує η_Γ ?
18. Як впливає регенерація на показники ГТУ?
19. Коли можлива регенерація у циклі ГТУ?
20. Чи можливо спалювати у закритій схемі ГТУ вугілля?
21. За рахунок чого збільшується l_t закритої схеми ГТУ?
22. Як змінюються показники багатоступеневого циклу ГТУ?
 $(< l_K, > l_T, > \eta_t); (> l_K, > l_T, > \eta_t); (< l_K, < l_T, > \eta_t).$

Тема 20. Теоретичні цикли ХМ

1. На що витрачається енергія ззовні а \mathcal{D}_p ХМ і в \mathcal{D}_T ХМ.
2. Які хладоагенти використовують в \mathcal{D}_p ХМ?
3. Які хладоагенти використовують в \mathcal{D}_T ХМ?
4. Чи можливо транспортувати холод на відстань?
5. Які основні вимоги до хладоагентів ХМ?
6. Чи конденсується хладоагент в \mathcal{D}_T ХМ?
7. Чи конденсується хладоагент в \mathcal{D}_p ХМ?
8. Чи може бути холодильний коефіцієнт зворотнього циклу Карно безмежно великим?



9. Як впливає заохолодження (або переохолодження) хладоагента після конденсатору на роботу ХМ?
10. Як впливає перегрів перед компресором на роботу D_p ХМ?
11. Як впливає ступінь стиску компресора на роботу D_T ХМ?
12. Яка основна перевага D_p ХМ порівняно з D_T ХМ?

Тема 21. Цикли ПСУ

1. Як змінюються η_t , x_2 на виході з турбіни зі збільшенням P_1 ?
2. Як змінюються η_t , x_2 на виході з турбіни зі збільшенням t_1 ?
3. Як змінюються η_t , x_2 на виході з турбіни зі збільшенням P_2 ?
4. Чи дорівнює η_t з граничною регенерацією для циклу ПСУ перегрітої пари η_{t_K} (ККД циклу Карно)?
5. Чи дорівнює η_t з граничною регенерацією для циклу ПСУ насиченої пари η_{t_K} (ККД циклу Карно)?
6. Для чого конденсатор в циклі ПСУ?
7. Для чого ЖН в циклі ПСУ?
8. Чому зростає ентальпія за турбіною порівняно з h_2 адіабатного розширення пари в турбіні?
9. Яке допустиме значення x_2 в кінцевих ступенях турбіни?
10. Показати тепло підведене у водяному економайзері на тепловій діаграмі.
11. Показати тепло підведене в екранах котла на тепловій діаграмі.
12. Показати тепло підведене в пароперегрівнику на тепловій діаграмі.
13. Показати підведене тепло у котлі q_1 на діаграмі $T - s$.



14. Показати відведене тепло у конденсаторі q_2 на діаграмі $T - s$.
15. Показати корисне тепло у q_0 на діаграмі $T - s$.
16. Показати на діаграмі $T - s$ тепло живильної води.
17. Перерахуйте втрати тепла в циклі ПСУ?
18. Які найбільші втрати тепла в циклі ПСУ?
19. Які потужності ПСУ в енергобалансі існують?
20. Яка найбільша потужність в енергобалансі циклу ПСУ?
21. Що характеризує N_0 ?
22. Що характеризує N_i ?
23. Що характеризує $N_{e\phi}$?
24. Що характеризує N_{el} ?
25. Що характеризує η_t ?
26. Що характеризує η_{KA} ?
27. Що характеризує η_{0i} ?
28. Що характеризує η_M ?
29. Що характеризує η_G ?
30. Чим відрізняються відносні ККД від абсолютнох?
31. Чим відрізняється теоретична питома витрата від пари d_0 від дійсної d ?
32. Для чого вводиться вторинний перегрів у циклі ПСУ?
33. Як змінюється η_t при використанні вторинного перегріву?
34. Як впливає вторинний перегрів на η_{0i} ?
35. Чи збільшується η_{0i} при введенні вторинного перегріву пари?
36. Як можна використати тепло Q_2 і які складності?
37. Чи збільшується η_t на ТЕЦ?
38. Яким чином підвищується теплова економічність ТЕЦ?
39. Де більше термічний ККД циклу ПСУ на конденсаційній ЕС, або на теплофікаційній ЕС?
40. Чи завжди збільшується η_t при введенні РП?



41. Які недоліки і переваги змішуючих і поверхневих РП?
42. Коли термічний ККД $\eta_{t_P} = \eta_{t_K}$?
43. Як розраховується оптимальна кількість РП?
44. Де краще встановлювати РП з відбором пари в початкових, або в кінцевих ступенях турбіни?
45. Які переваги ексергетичного методу оцінки ефективності циклів перед методом ККД (ентропійним методом)?
46. Чому η_{KA} набагато більше ексергетичного ККД котлоагрегату?
47. Яка різниця між ексергією робочого тіла і ексергією тепла?

8. Індивідуальна робота

Індивідуальна робота передбачена навчальним планом у вигляді:

- III семестр РГР - 12 годин;
- IV семестр КР - 18 годин.

Мета РГР - закріпити знання набуті студентами при вивчені розділів розрахунку теплофізичних характеристик РТ, процесів ідеальних (газів) і реальних (водяної пари) робочих тіл, які далі використовуються у ТД.

Мета КР - набути навиків у розрахунку циклів теплових двигунів - ТД, вміння оцінювати ефективність циклів ентропійним, енергетичним і методом коефіцієнтів корисної дії, методів удосконалення циклів ТД.

8.1. РГР - тема, завдання

Тема: - розрахунок процесів ідеального і реального РТ. Об'єм розрахунково-пояснювальної записки з діаграмами, графіками процесів складає до 20 сторінок.

Варіанти завдань по газових процесах вибирати з завдання 1, або 2 (по вказівках викладача).

Варіанти завдань по процесах водяної пари вибирати з завдання 3.

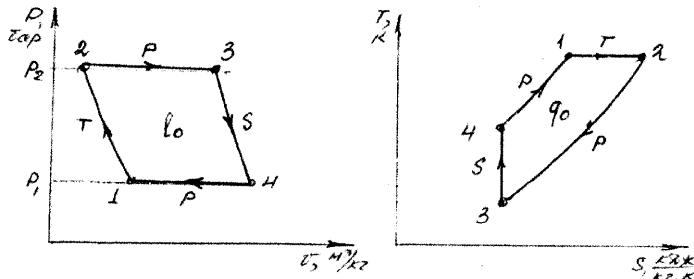


Методичні рекомендації по виконанню РГР:

Завдання №1

Послідовність виконання:

- по обраним процесам і деяким виданим параметрам бу-
дуємо круговий процес (цикл) у $P-v$ і $T-s$ діагра-
мах. Наприклад, по даних вар. 01:



- Розрахунок процесів [тема 5, 6] (параметри фізичні та енергетичні);

Розрахунок:

- роботи розширення $l_1 = l_{2-3} + l_{3-4}$;
- роботи стиску $l_2 = l_{4-1} + l_{1-2}$;
- корисної роботи $l_0 = l_1 - l_2$;
- підведене тепло $q_1 = q_{4-1} + q_{1-2}$;
- відведене тепло $q_2 = q_{2-3}$;
- корисне тепло $q_0 = q_1 - q_2$;

Перевірка: $l_0 = q_0$ [тема 14].

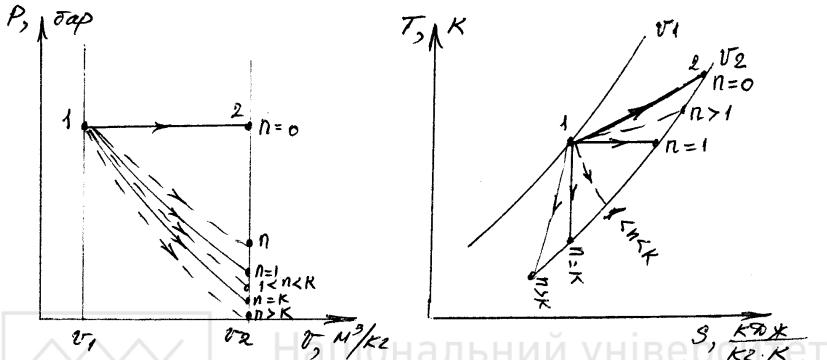
- термічний ККД: $\eta_t = \frac{q_0}{q_1}$;
- ККД циклу Карно: $\eta_{t_K} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$;
- ступінь термодинамічної досконалості циклу
$$\eta_{0t} = \frac{h_t}{h_{t_K}}$$
.



Завдання 2

Послідовність виконання:

- по обраному складу суміші розрахувати теплофізичні характеристики суміші [тема 3];
- зобразити процеси в $P-v$ і $T-s$ діаграмах.



Приклад - процеси розширення.

- розрахунок процесів (фізичних параметрів і зміну енергетичних параметрів) [тема 5, 6].

Тема: газові процеси. Завдання №1

Задано термодинамічні процеси, з яких складається пряний теоретичний цикл теплового двигуна. Робоче тіло: 1 кг повітря, $C = const$;

Визначити:

- параметри стану робочого тіла в характерних точках P_1, v_1, t_1 ;
- зміну енергетичних параметрів в процесах $\Delta u, \Delta i, \Delta s$;
- роботу I_1, I_2 корисну роботу I_0 ;
- тепло q_1, q_2 корисне тепло q_0 ;
- ККД термічний η_t . ККД циклу Карно η_{tk} ступінь термодинамічної досконалості циклу η_{0t} .



Скласти зведену таблицю результатів розрахунків і побудувати графіки процесів в $P - v$ і $T - s$ діаграмах.

№ завдання	Параметри						Характеристика процесу
	1	2	3	4	5	6	
01	$P_1 = 5$ бар, $P_2 = 10$ бар, $v_2 = 0,09 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v_3 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$						
02	$P_1 = 1$ бар, $P_2 = 2$ бар, $v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v_3 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$						
03	$P_1 = 3$ бар, $P_2 = 6$ бар, $v_2 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$, $v_3 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$						
04	$P_1 = 6$ бар, $t_1 = 200^\circ\text{C}$, $t_2 = 300^\circ\text{C}$, $v_3 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$, $P_5 = 3$ бар						
05	$P_1 = 8$ бар, $t_1 = 250^\circ\text{C}$, $t_2 = 400^\circ\text{C}$, $v_3 = 0,7 \text{ м}^3/\text{кг}$, $P_5 = 2$ бар						
06	$P_1 = 10$ бар, $t_1 = 300^\circ\text{C}$, $t_2 = 400^\circ\text{C}$, $v_3 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$, $P_5 = 2$ бар						
07	$t_1 = 25^\circ\text{C}$, $P_1 = 3$ бар, $P_2 = 20$ бар, $t_3 = 550^\circ\text{C}$						
08	$t_1 = 25^\circ\text{C}$, $P_1 = 1,5$ бар, $P_2 = 10$ бар, $t_3 = 500^\circ\text{C}$						
09	$t_1 = 30^\circ\text{C}$, $P_1 = 2$ бар, $P_2 = 16$ бар, $t_3 = 600^\circ\text{C}$						
10	$P_1 = 3$ бар, $v_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$, $P_2 = 10$ бар, $t_3 = 200^\circ\text{C}$						
11	$P_1 = 2$ бар, $v_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$, $P_2 = 10$ бар, $t_3 = 400^\circ\text{C}$						
12	$P_1 = 1$ бар, $v_1 = 0,9 \text{ м}^3/\text{кг}$, $P_2 = 5$ бар, $t_3 = 1200^\circ\text{C}$						
13	$P_1 = 12$ бар, $P_2 = 14$ бар, $v_1 = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_3 = 160^\circ\text{C}$						
14	$P_1 = 2$ бар, $P_2 = 4$ бар, $v_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_3 = 1000^\circ\text{C}$						
15	$P_1 = 6$ бар, $P_2 = 9$ бар, $v_1 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_3 = 350^\circ\text{C}$						
16	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_1 = 50^\circ\text{C}$, $t_3 = 300^\circ\text{C}$, $P_2 = 25$ бар						
17	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_1 = 100^\circ\text{C}$, $t_3 = 350^\circ\text{C}$, $P_2 = 20$ бар						
18	$v_1 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_1 = 150^\circ\text{C}$, $t_3 = 850^\circ\text{C}$, $P_2 = 15$ бар						
19	$P_1 = 2$ бар, $P_2 = 10$ бар, $t_2 = 300^\circ\text{C}$, $q_{2-3} = 1050 \text{ кДж/кг}$						
20	$P_1 = 1$ бар, $P_2 = 5$ бар, $t_2 = 300^\circ\text{C}$, $q_{2-3} = 500 \text{ кДж/кг}$						
21	$P_1 = 1$ бар, $P_2 = 8$ бар, $t_2 = 300^\circ\text{C}$, $q_{2-3} = 800 \text{ кДж/кг}$						
22	$P_1 = 0,8$ бар, $t_1 = 10^\circ\text{C}$, $v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_3 = 227^\circ\text{C}$						
23	$P_1 = 2$ бар, $t_1 = 100^\circ\text{C}$, $v_2 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_3 = 400^\circ\text{C}$						
24	$P_1 = 3$ бар, $t_1 = 10^\circ\text{C}$, $v_2 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$, $t_3 = 250^\circ\text{C}$						



25	$P_1 = 1,2 \text{ бар}, t_1 = 85^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 15, q_{2-3} = 920 \text{ кДж/кг}$	$T = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$S = \text{const}$	$P_2 > P_1$
26	$P_1 = 1,2 \text{ бар}, t_1 = 20^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 12, q_{2-3} = 500 \text{ кДж/кг}$	$v = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$P = \text{const}$	$P_2 > P_1$
27	$P_1 = 1,2 \text{ бар}, t_1 = 40^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 8, q_{2-3} = 300 \text{ кДж/кг}$	$S = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$S = \text{const}$	$S = \text{const}$
28	$U_1 = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг}, t_1 = 80^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 14, q_{2-3} = 840 \text{ кДж/кг}$	$T = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$
29	$U_1 = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг}, t_1 = 50^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 16, q_{2-3} = 900 \text{ кДж/кг}$	$S = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$P = \text{const}$	$P = \text{const}$
30	$U_1 = 1,1 \text{ м}^3/\text{кг}, t_1 = 30^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 12, q_{2-3} = 700 \text{ кДж/кг}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$
31	$P_1 = 0,8 \text{ бар}, t_1 = 10^\circ\text{C}, U_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}, t_3 = 225^\circ\text{C}$	$v = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$
32	$P_1 = 1,2 \text{ бар}, t_1 = 30^\circ\text{C}, U_2 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}, t_3 = 250^\circ\text{C}$	$T = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$P = \text{const}$	$P = \text{const}$
33	$P_1 = 2 \text{ бар}, t_1 = 50^\circ\text{C}, U_2 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}, t_3 = 350^\circ\text{C}$	$S = \text{const}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$	$S = \text{const}$
34	$U_1 = 1,2 \text{ м}^3/\text{кг}, t_1 = 120^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 5, q_{2-3} = 750 \text{ кДж/кг}$	$T = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$
35	$U_1 = 1,2 \text{ м}^3/\text{кг}, t_1 = 80^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 6, q_{2-3} = 840 \text{ кДж/кг}$	$S = \text{const}$	$v = \text{const}$	$P = \text{const}$	$P = \text{const}$
36	$U_1 = 1,2 \text{ м}^3/\text{кг}, t_1 = 150^\circ\text{C}, \varepsilon = U_1/U_2 = 7, q_{2-3} = 680 \text{ кДж/кг}$	$v = \text{const}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$	$S = \text{const}$
37	$P_1 = 30 \text{ бар}, t_1 = 400^\circ\text{C}, P_2 = 14 \text{ бар}, P_3 = 6 \text{ бар}$	$T = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$
38	$P_1 = 30 \text{ бар}, t_1 = 450^\circ\text{C}, P_2 = 20 \text{ бар}, P_3 = 6 \text{ бар}$	$S = \text{const}$	$v = \text{const}$	$P = \text{const}$	$P = \text{const}$
39	$P_1 = 30 \text{ бар}, t_1 = 550^\circ\text{C}, P_2 = 20 \text{ бар}, P_3 = 5 \text{ бар}$	$v = \text{const}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$	$S = \text{const}$
40	$P_1 = 50 \text{ бар}, U_2 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}, P_3 = 5 \text{ бар}, t_4 = -35^\circ\text{C}$	$T = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$
41	$P_1 = 60 \text{ бар}, U_2 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}, P_3 = 5 \text{ бар}, t_4 = 20^\circ\text{C}$	$S = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$P = \text{const}$	$P = \text{const}$
42	$P_1 = 40 \text{ бар}, U_2 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}, P_3 = 4 \text{ бар}, t_4 = 10^\circ\text{C}$	$v = \text{const}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$	$S = \text{const}$
43	$P_1 = 3,5 \text{ бар}, U_1 = 0,25 \text{ м}^3/\text{кг}, P_2 = 20 \text{ бар}, t_3 = 300^\circ\text{C}$	$T = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$
44	$P_1 = 2,5 \text{ бар}, U_1 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}, P_2 = 15 \text{ бар}, t_3 = 370^\circ\text{C}$	$S = \text{const}$	$v = \text{const}$	$P = \text{const}$	$P = \text{const}$
45	$P_1 = 4 \text{ бар}, U_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}, P_2 = 25 \text{ бар}, t_3 = 450^\circ\text{C}$	$v = \text{const}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$	$S = \text{const}$
46	$P_1 = 13 \text{ бар}, t_1 = 300^\circ\text{C}, t_3 = 17^\circ\text{C}, P_3 = 1 \text{ бар}$	$T = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$
47	$P_1 = 17 \text{ бар}, t_1 = 350^\circ\text{C}, t_3 = 30^\circ\text{C}, P_3 = 1,2 \text{ бар}$	$S = \text{const}$	$v = \text{const}$	$P = \text{const}$	$P = \text{const}$
48	$P_1 = 10 \text{ бар}, t_1 = 300^\circ\text{C}, t_3 = 20^\circ\text{C}, P_3 = 0,5 \text{ бар}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$
49	$P_1 = 2 \text{ бар}, U_1 = 0,45 \text{ м}^3/\text{кг}, P_3 = 12 \text{ бар}, U_2 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$	$S = \text{const}$	$P_2 > P_1$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$
50	$P_1 = 2 \text{ бар}, U_1 = 0,45 \text{ м}^3/\text{кг}, P_3 = 15 \text{ бар}, U_2 = 0,14 \text{ м}^3/\text{кг}$	$v = \text{const}$	$T = \text{const}$	$S = \text{const}$	$S = \text{const}$
51	$P_1 = 1 \text{ бар}, U_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}, P_3 = 10 \text{ бар}, U_2 = 0,51 \text{ м}^3/\text{кг}$	$P = \text{const}$	$S = \text{const}$	$v = \text{const}$	$v = \text{const}$

Тема: Газові процеси. Завдання №2

В циліндрі поршневої машини M кг газової суміші, відносний об'ємний склад якої t_{CO_2} , r_{O_2} , r_{N_2} , з початковим тиском P_1 і температурою t_1 розширяються (стискаються) до m -кратного збі-



льшення (зменшення) об'єму, $m = \frac{V_2}{V_1} \left(m = \frac{V_1}{V_2} \right)$.

Розширення (стискування) газу проходить:

- ізотермічно;
- адіабатно;
- ізобарно;
- політропно з показником політропи n .

Розраховувати:

- газову суміш визначивши: $g_1, \mu_c, R_c, v_c, \rho_c, C_{p_c}, C'_{p_c}, C_{v_c}, C'_{v_c}$.
- газові процеси, для кожного розраховувати $P_i, v_i, t_i, l, q, \Delta u, \Delta i, \Delta s$.

Скласти зведену таблицю результатів розрахунків і побудувати графіки процесів в $P - v$ і $T - s$ діаграмах.

Остання цифра № залікової книжки	0	1	2	3	4	Напрямок процесу				
P_1 , бар	20	18	16	14	12	Розширення				
$t_1, ^\circ\text{C}$	1000	800	700	600	500					
$m = V_2 / V_1$	6	7	8	9	10					
Остання цифра № залікової книжки	5	6	7	8	9	Напрямок процесу				
P_1 , бар	1	1,2	1,4	1,6	1,8	Стискування				
$t_1, ^\circ\text{C}$	20	30	40	50	60					
$m = V_2 / V_1$	10	9	8	7	6					
Передостання цифра № залікової книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M , кг	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
r_{CO_2} , %	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
r_{CO_2} , %	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
r_{N_2} , %	76	72	68	64	60	56	52	48	44	40
n_1	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72
n_2	1,10	1,12	1,14	1,16	1,18	1,20	1,17	1,15	1,13	1,11
n_3	1,68	1,66	1,64	1,62	1,60	1,58	1,56	1,54	1,52	1,50



Тема : Процеси водяної пари. Завдання №3

Задано початковий стан водяної пари. Необхідно знайти кінцевий стан після здійснення чотирьох процесів: ізохори, ізобари, ізотерми, адіабати, для чого визначити параметри стану: P_i , v_i , t_i , h_i , s_i , u_i , X в початковому і кінцевому стані, роботу I , тепло в процесі q . Зобразити процеси в $P-v$, $T-s$, $h-s$ діаграмах.

Розмірності: P - бар, v - м³/кг, t - °C, h - кДж/кг, s - кДж/(кг·град), u - кДж/кг.

№ завдання	Відомі параметри початкового стану		Відомі параметри кінцевого стану після здійснення таких процесів:			
			ізохори	ізобари	ізотерми	адіабати
1	2	3	4	5	6	
01	$P_1 = 6$	$t_1 = 175$	$P_2 = 10$	$X_2 = 0,95$	$P_2 = 3$	$P_2 = 1$
02	$P_1 = 16$	$X_1 = 0,96$	$P_2 = 13$	$t_2 = 250$	$s_2 = 7$	$P_2 = 3$
03	$P_1 = 10$	$t_1 = 300$	$t_2 = 350$	$t_2 = 3500$	$i_2 = 2900$	$P_2 = 1$
04	$P_1 = 22$	$t_1 = 250$	$s_2 = 6,5$	$t_2 = 2500$	$P_2 = 10$	$P_2 = 1$
05	$P_1 = 8$	$X_1 = 0,96$	$t_2 = 270$	$s_2 = 6,5$	$i_2 = 2500$	$i_2 = 2100$
06	$P_1 = 29$	$t_1 = 400$	$t_2 = 2800$	$t_2 = 3500$	$P_2 = 5$	$t_2 = 200$
07	$P_1 = 20$	$t_1 = 340$	$s_2 = 6,4$	$s_2 = 7,2$	$P_2 = 4$	$t_2 = 140$
08	$P_1 = 10$	$t_1 = 260$	$t_2 = 300$	$s_2 = 7,5$	$P_2 = 2$	$t_2 = 100$
09	$P_1 = 10$	$X_1 = 1$	$t_2 = 180$	$t_2 = 300$	$s_2 = 7$	$i_2 = 2000$
10	$P_1 = 60$	$X_1 = 0,9$	$t_2 = 280$	$t_2 = 320$	$P_2 = 0,9$	$X_2 = 0,8$
11	$P_1 = 4$	$X_1 = 0,8$	$X_2 = 1$	$t_2 = 160$	$s_2 = 10$	$i_2 = 2500$
12	$P_1 = 15$	$X_1 = 0,8$	$t_2 = 2600$	$s_2 = 6,8$	$i_2 = 2850$	$i_2 = 3100$
13	$P_1 = 8$	$X_1 = 0,95$	$P_2 = 7$	$t_2 = 2800$	$s_2 = 7,2$	$t_2 = 350$
14	$P_1 = 60$	$t_1 = 350$	$s_2 = 6$	$s_2 = 5,7$	$i_2 = 2800$	$X_2 =$
15	$P_1 = 14$	$t_1 = 2600$	$t_2 = 3200$	$t_2 = 320$	$s_2 = 6,4$	$i_2 = 2100$
16	$P_1 = 8$	$X_1 = 0,84$	$t_2 = 2800$	$t_2 = 2500$	$X_2 = 0,95$	$i_2 = 3200$
17	$P_1 = 18$	$s_1 = 6$	$s_2 = 6,4$	$s_2 = 6,6$	$P_2 = 3$	$X_2 =$
18	$P_1 = 16$	$t_1 = 300$	$X_2 = 1$	$X_2 = 0,86$	$s_2 = 7,5$	$i_2 = 2900$
19	$P_1 = 1$	$t_1 = 200$	$X_2 = 0,68$	$v_2 = 1,6$	$X_2 = 0,95$	$i_2 = 2100$



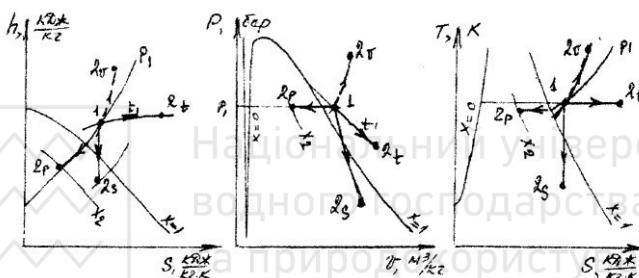
20	$P_1 = 16$	$t_1 = 300$	$t_2 = 250$	$v_2 = 0,1$	$P_2 = 8$	$i_2 = 2150$
21	$P_1 = 20$	$t_1 = 400$	$X_2 = 0,95$	$i_2 = 3000$	$P_2 = 29$	$P_2 = 0,5$
22	$P_1 = 140$	$t_1 = 500$	$P_2 = 100$	$t_2 = 400$	$P_2 = 90$	$X_2 = 0,7$
23	$P_1 = 125$	$t_1 = 520$	$P_2 = 80$	$t_2 = 350$	$v_2 = 0,3$	$v_2 = 1,2$
24	$P_1 = 90$	$t_1 = 480$	$t_2 = 540$	$X_2 = 0,95$	$P_2 = 30$	$i_2 = 2100$
25	$P_1 = 29$	$t_1 = 380$	$X_2 = 0,9$	$t_2 = 280$	$v_2 = 0,6$	$P_2 = 0,04$
26	$P_1 = 35$	$t_1 = 435$	$t_2 = 300$	$v_2 = 0,05$	$s_2 = 7,8$	$X_2 = 0,8$

Завдання 3

Послідовність розрахунку процесів водяної пари:

- побудова процесів у діаграмах водяної пари [теми 7, 16, 17].

Приклад: вар 01.



1-2₀ – ізохора; 1-2_t – ізотерма;

1-2_p – ізобара; 1-2_s - адіабата

- з діаграми $h - s$ знімаємо початкові та кінцеві параметри. Внутрішня енергія розраховується за формулою $u = h - 10^2 \cdot P \cdot V$, де тиск P підставляти в барах.

В масштабі можливо побудувати процеси тільки в $h - s$ діаграмі.

8.2. КР - тема, завдання

Тема: Тепловий розрахунок теоретичних циклів ТД

Об'єм розрахунково-пояснювальної записки з графічною частиною - зображення схем і теоретичних циклів у термодинамічних діаграмах ($P - v$, $T - s$, $h - s$) складає до 30 сторінок формату А-4, згідно ЕСКД.



Перелік теоретичних циклів ТД:

- поршневий компресор - ПК (завдання 1);
- двигун внутрішнього згорання - ДВЗ (завдання 2);
- газотурбінна установка - ГТУ (завдання 3);
- дросельна холодильна машина - ДрХМ (завдання 4);
- паросилова установка - ПСУ (завдання 5).

Методичні рекомендації по виконанню КР

Завдання 1. Розрахунок ПК [тема 15, 16]

Послідовність розрахунку. Визначити:

- максимальну ступінь стиску - X_{\max} ;
- кількість ступенів z ;
- дійсну ступінь стиску X_i ;
- параметри в характерних точках (P_i, T_i);
- роботу політропного стиску l_k^n і ізотермічного стиску l_k^t ;
- продуктивність компресору $V_k = \eta_V \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot s \cdot m^3/\text{c}$;
- теоретичну потужність N_o ;
- тепло охолодження;
- ККД ПК $\eta_{PK} = \eta_{izom} \cdot \eta_{0i} \cdot \eta_M \cdot \eta_{\partial e}$.
- дійсну потужність $N_{\partial e} = \frac{N_o}{\eta_{PK}}$, кВТ.

Завдання 2. Розрахунок ДВЗ [тема 17]

Послідовність розрахунку. Визначити:

- параметри в характерних точках циклу (P_i, T_i);
- зміну енергетичних параметрів: $\Delta u, \Delta h, \Delta s$;
- питомий об'єм V_i , - по завданню викладача.

**Завдання 1. Тема: Поршневий компресор**

Повітря з початковим тиском P_1 бар і початковою температурою t_1 стискається у поршневому компресорі до кінцевого тиску P_2 по політропі з показником n , $C = const$. Охолодження водяне. Підвищення температури води в системі охолодження Δt_θ . Максимальна допустима температура повітря в циліндрі компресора t_{max} . Діаметр циліндра D , хід поршня S , кількість обертів m , коефіцієнт подачі $\eta_V = 0,8$.

Розрахувати: продуктивність компресора, максимальний допустимий ступінь підвищення тиску в ступені, кількість ступенів стискування і дійсний ступінь підвищення тиску в ступені, параметри стану (P_i, v_i, t_i) в характерних точках, зміну енергетичних параметрів в процесах ($\Delta u, \Delta i, \Delta s$), роботу ступені і загальну роботу компресора для політропного та ізотермічного стискування, теоретичну потужність двигуна для приводу компресора, ККД компресора, кількість тепла, яке відводиться в системі охолодження, витрату охолоджувальної води, дати графіки робочого процесу в $P - V$ та $T - s$ діаграмах.

<i>Остання цифра № залікової книжки</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	27	20	22	15	12	10	11	14	25	18
P_2 , бар	100	200	25	160	220	148	240	27	26	128
n	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,22	1,2	1,18	1,23
$t_{max}, ^\circ\text{C}$	140	200	180	250	150	200	150	140	130	250
<i>Передостання цифра № залікової книжки</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta t_\theta, ^\circ\text{C}$	10	12	15	13	7	12	9	8	11	10
D , м	0,1	0,12	0,12	0,2	0,21	0,25	0,27	0,28	0,3	0,32
S , м	0,15	0,2	0,22	0,3	0,32	0,35	0,4	0,3	0,38	0,4
m , об/хв	300	900	800	1200	100	700	1500	350	600	700

**Завдання 2. Тема: Теоретичні цикли ДВЗ**

Для чотиритактного ДВЗ задано ступінь стиску ϵ , ступінь підвищення тиску λ , ступінь попереднього розширення ρ , діаметр циліндра D , хід поршня S , кількість обертів n , кількість циліндрів Z , початковий тиск P_1 і початкова температура t_1 . Робоче тіло – повітря. $C = const$. Механічний ККД $\eta_M = 0,90$, $\eta_{0i} = 0,9$, $\eta_{k3} = 0,95$.

Розрахувати: корисний об'єм V_h , параметри стану (P_i, v_i, t_i) в характерних точках циклу, зміну енергетичних параметрів в процесах ($\Delta u, \Delta i, \Delta s$), підведене $q_{nid\delta}$, відведене $q_{eid\delta}$, і корисне q_o тепло, роботу розширення $I_{розш}$, стискування $I_{стис}$ і корисну роботу I_o , термічний ККД η_t , ККД циклу Карно η_t^k , ступінь термодинамічної досконалості циклу η_{ot} , $N_{eф}$ - ефективну потужність двигуна. Зобразити цикл ДВЗ в термодинамічних діаграмах.

<i>Остання цифра № залікової книжки</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε	21	20	22	8	9	7	15	17	18	19
λ	-	-	-	1,25	1,33	1,3	1,2	1,4	1,35	1,32
ρ	1,3	1,4	1,5	-	-	-	1,3	1,35	1,4	1,5
Z	2	4	6	2	4	6	2	4	6	4
<i>Передостання цифра № залікової книжки</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_1 , бар	1	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
$t_1, ^\circ\text{C}$	20	18	10	17	8	25	16	15	12	19
D , м	0,8	0,2	0,1	0,3	0,25	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6
S , м	1	0,25	0,2	0,35	0,3	0,4	0,45	0,5	0,7	0,8
$n \cdot 10^{-3}$, об/хв	1,8	2	2,2	2,3	2,4	2,5	1,9	2,1	2,6	2,8

- підведене q_1 і відведене тепло q_2 , корисне тепло q_0 ;
- роботу розширення I_1 , стиску I_2 , корисну роботу I_o ;



перевірка $q_0 = l_0$;

- термічний ККД циклу ДВЗ - η_t , циклу Карно η_{tk} , ступінь термодинамічної досконалості $\eta_{0t} = l_t / \eta_{tk}$;

$$- \text{ ККД ДВЗ } \eta_{\text{ДВЗ}} = \eta_{kz} \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_M = \frac{N_{e\phi}}{Q_l};$$

- ефективну потужність $N_{e\phi}$:

$$N_{e\phi} = Q_l \cdot \eta_{\text{ДВЗ}}; Q_l = M_{PT} \cdot q_l;$$

$$M_{PT} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{1}{2 \cdot v_l} \cdot z, \text{ кг/с} - \text{ витрата робочого}$$

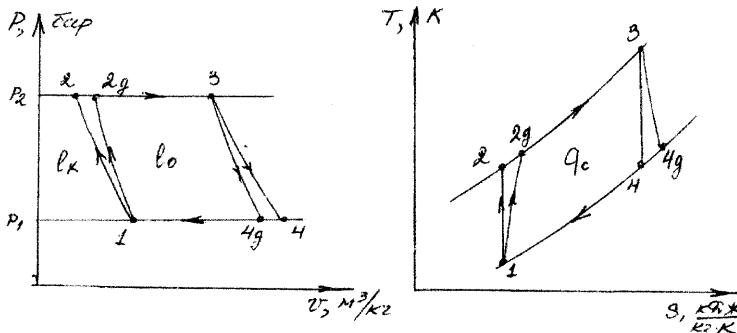
тіла за цикл, який здійснюється за два оберти валу, для всіх циліндрів.

Завдання 3. Цикл ГТУ з ізобарним підводом тепла.

Послідовність розрахунку, [тема 18, 19]

Визначити:

- фізичні параметри P_i , T_i , (питомий об'єм, зміну енергетичних параметрів – Δu , Δs - по вказівці викладача) в характерних точках циклу;
- відобразити схему ГТУ і цикл теоретичний і дійсний в діаграмах $P - v$ та $T - s$.



1-2-3-4 – теоретичний (оборотний) цикл;

1-2g-3-4g – дійсний (необоротний) цикл, який здійснюється з втратами на тертя, і це тепло тертя збільшує ентальпію на виході з



ПК і ГТ, процеси стиску в ПК і розширення в ГТ здійснюються по політропах $1-2g$ і $3-4g$, внаслідок чого збільшується робота компресору і зменшується технічна робота газової турбіни – ГТ.

- теоретичні температури:

$$T_2 = T_1 \cdot X^{\frac{k-1}{k}}; T_4 = T_1 \cdot \frac{T_3}{T_2};$$

- дійсні температури:

$$\eta_{oi}^k = \frac{h_2 - h_1}{h_{2g} - h_1} = \frac{t_2 - t_1}{t_{2g} - t_1}; t_{2g} = \frac{t_2 - t_1}{\eta_{oi}^k} + t_1, {}^\circ C.$$

- теоретичні потужності

$$\text{компресор} N_0^k = M(h_2 - h_1) = M \cdot C_p(t_2 - t_1), \text{кВт};$$

$$\text{турбіни} N_0^T = M(h_3 - h_4) = M \cdot C_p(t_3 - t_4), \text{кВт};$$

- дійсні потужності (внутрішні)

$$N_i^T = MC_p(t_3 - t_{4g}) = \frac{N_o^T}{\eta_{oi}^T}, \text{кВт};$$

$$N_i^K = MC_p(t_{2g} - t_1) = \frac{N_o^K}{\eta_{oi}^K}, \text{кВт};$$

$$\text{Потужність ГТУ } N_i^{GTV} = N_i^T - N_i^K, \text{кВт};$$

- роботу $l_T, l_K, l_0 = l_T - l_K$;

- тепло $q_1, q_2, q_0 = q_1 - q_2$;

Перевірка $l_0 = q_0$;

- ККД $\eta_t, \eta_{t_K}, \eta_{ot}$.

- ККД компресору $\eta_K = \eta_{oi}^K \cdot \eta_M \cdot \eta_{DB}$.