

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет “Запорізька політехніка”

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи з теплотехнічних дисциплін для студентів освітньо-професійних програм “Експлуатація, випробування та сервіс автомобілів та тракторів”, “Двигуни внутрішнього згорання”, “Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів” денної та заочної форм навчання

Методичні вказівки до самостійної роботи з теплотехнічних дисциплін для студентів освітньо-професійних програм “Експлуатація, випробування та сервіс автомобілів та тракторів”, “Двигуни внутрішнього згорання”, “Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів” денної та заочної форм навчання /Укл.: Н.Є. Рябошапка. – Запоріжжя, НУ “Запорізька політехніка”, 2024. – 34с.

Укладач: Наталя Рябошапка, ст. викл.

Рецензент: Наталія Євсєєва, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: Віктор Алмаєв, зав. лаб.

Затверджено
на засіданні кафедри
“Автомобілі, теплові двигуни та
гібридні енергетичні установки”
протокол № 3
від “17” жовтня 2024 р.

Рекомендовано до видання
НМК Транспортного факультету
протокол № 3
від “8” листопада 2024 р.

ЗМІСТ

	стор.
ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ	4
1 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ №1. Термодинаміка відкритих систем. Дослідження циклів теплових двигунів (для всіх спеціальностей).....	5
1.1 Задача 1. Аналіз розімкнених термодинамічних процесів ідеального газу (для всіх спеціальностей) ...	5
1.2 Задача 2. Визначення термодинамічних параметрів у характерних точках циклу та енергетичних характеристик ДВЗ, що працює за циклом з сумісним підведенням теплоти при сталому об'ємі і тиску (циклом Трінклера) (для спеціальності 133)	9
1.3 Задача 2. Аналіз термодинамічних процесів стискування газів у поршневому компресорі (для спеціальності 136)	15
1.4 Контрольні запитання	20
2 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ №2. Конвективний теплообмін. Теплопередача	21
2.1 Задача 1. Розрахунок та графічне зображення процесів конвективного теплообміну в технологічних системах (для спеціальності 133).....	21
2.2 Задача 2. Дослідження теплопровідності крізь плоску багатошарову стінку при стаціонарному режимі (для спеціальності 136).....	24
2.3 Задача 3. Дослідження теплопередачі крізь плоску стінку. Інтенсивність теплопередачі (для всіх спеціальностей).....	26
2.4 Контрольні запитання	30
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	32
Додаток А	33

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

В результаті теплотехнічної підготовки студенти повинні одержати навички грамотної експлуатації теплоенергетичних машин, агрегатів і устаткування на основі фундаментального вивчення розділів теплотехніки: технічної термодинаміки, механіки рідини та газу, теорії тепломасообміну. Але треба не тільки мати знання, але й вміти їх застосовувати, зокрема вміти проводити інженерні розрахунки термодинамічних процесів у металургійних та теплоенергетичних агрегатах, при русі рідин і газів у трубах, каналах і в робочому просторі теплоагрегатів, процесів теплообміну при нагріванні та обробці матеріалів, процесів масообміну при сушінні матеріалів. Саме цьому і присвячені практичні заняття у формі самостійного проведення розрахунків як поза, так і в аудиторії.

Для повного зрозуміння та засвоєння лекційного матеріалу з теплотехнічних дисципліни і здобуття досвіду самостійного проведення інженерних розрахунків студенти повинні виконати два розрахунково-графічних завдання, кожне з яких складається з двох інженерних задач та письмових відповідей на контрольні запитання.

РГЗ виконуються за індивідуальними варіантами. Особливу увагу приділяють фізичному та інженерному тлумаченню впливу різних факторів на перебіг термодинамічних процесів.

При виконанні розрахунково-графічних завдань студенти повинні виконувати такі вимоги:

а) звіт про виконання завдання представляти на одному боці аркуша формату А4;

б) користуючись розрахунковими рівняннями (формулами), треба в квадратних дужках вказувати джерело інформації і сторінку (номер формули у круглих дужках праворуч від неї).

Під формулами необхідно вказувати:

- назви величин, що входять у формулу;
- одиниці вимірювання (розмірності);

в) графічне зображення термодинамічних процесів здійснювати у масштабі на міліметровому папері з використанням креслярських приладів.

Звіти про виконання РГЗ студенти здають у вказані викладачем терміни на перевірку і після схвалення захищають з оцінкою.

Під час захисту студенту пропонуються уніфіковані запитання (елементарні задачі).

Якщо студент вірно і вчасно виконав РГЗ, викладачу надається право заліку завдання без захисту, при цьому береться до уваги загальне зразкове відношення студента до предмета.

1 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ №1

Термодинаміка відкритих систем. Дослідження циклів теплових двигунів (для всіх спеціальностей)

1.1 Задача 1. Аналіз розімкнених термодинамічних процесів ідеального газу (для всіх спеціальностей)

За умов відсутності масообміну між системою та навколишнім середовищем (система замкнута) може відбуватися тепла або силова взаємодія між системою і навколишнім середовищем. При цьому змінюється її стан і, отже, параметри стану.

Задачею аналізу будь-якого термодинамічного процесу є установлення зміни параметрів стану системи та з'ясування особливостей перетворення енергії в процесі.

Умови задачі. Газ масою m , кг із початковими параметрами p_1 і t_1 стискується або розширюється до десятикратного змінення об'єму в ізотермічному, адіабатному і політропному процесах.

Вид та масу газу обрати за останньою цифрою шифру з табл. 1.1.

Початкові параметри p_1 і t_1 відповідно для процесів стискування або розширювання та показник політропи n обрати за передостанньою цифрою шифру.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

Початкові параметри	Стиск від $p_1=1$ бар і $t_1=20^\circ\text{C}$					Розширення від $p_1=1$ МПа і $t_1=700^\circ\text{C}$				
Шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Газ	CO	CO ₂	N ₂	O ₂	повітря	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	NO	NH ₃
m , кг	12	15	20	30	40	5	8	25	10	7
n	1.2	1.5	1.15	1.55	1.48	1.17	1.22	1.53	1.25	1.58

Вимоги до розв'язання задачі. Визначити початковий V_1 і кінцевий V_2 об'єми газу; кінцеві температури T_2 і тиски p_2 газу в

ізотермічному, адіабатному і політропному процесах; енергетичні характеристики газу в ізотермічному, адіабатному і політропному процесах.

Провести повний аналіз заданих процесів за загальною схемою. Скласти зведену таблицю результатів розрахунку.

Скласти схеми енергобалансів для ізотермічного, адіабатного та політропного процесів.

Побудувати p - v - та T - s - діаграми перебігу даних процесів на міліметровому папері і указати стрілочкою напрямок перебігу процесів.

Провести порівняльний аналіз одержаних результатів та прийняти інженерне рішення.

Послідовність виконання задачі.

Визначення властивостей газу (R , c_v , c_p):

газова стала будь-якого газу:

$$R = 8314.2 / \mu_i, [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})],$$

тут μ_i , [кг/кМоль] – молекулярна маса заданого газу.

Питома масова теплоємність:

$$\text{ізохорна } c_v = R/(k-1), [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})];$$

$$\text{ізобарна } c_p = k c_v = kR/(k-1), [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})] \text{ або } c_p = (c_v + R), [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})]$$

тут показник адіабати $k = c_p/c_v$ обирається за кількістю атомів у молекулі газу.

Початковий об'єм з рівняння Клапейрона для довільної маси газу:

$$p_1 V_1 = m R T_1,$$

$$\text{тобто } V_1 = m R T_1 / p_1, \text{ м}^3.$$

Кінцевий об'єм V_2 визначається за умов десятикратного змінення після стиснення або розширення газу.

Загальна схема аналізу процесів:

- записати умови перебігу процесу;
- записати рівняння зв'язку між термодинамічними параметрами та визначити кінцеві тиск p_2 і температуру T_2 ;
- визначити енергетичні характеристики процесу.

Визначення змінення внутрішньої енергії газу за загальною формулою:

$$\text{питоме } \Delta u = c_v (T_2 - T_1), [\text{Дж}/\text{кг}];$$

повне $\Delta U = \Delta u \cdot m$, Дж [кДж, МДж].

Розрахування механічної роботи процесу стиснення або розширення газу за загальною формулою:

$$\text{питома } \ell = \int_{v_1}^{v_2} p dv, \text{ [Дж/кг];}$$

повна $L = \ell \cdot m$, Дж [кДж, МДж].

Визначення теплоємності за загальною формулою:

$$c = c_v(n-k)/(n-1), \text{ [Дж/кг}\cdot\text{K];}$$

Розрахування кількості наданої або відведеної теплоти за загальною формулою (за виключенням визначення теплоти в ізотермічному процесі):

$$\text{питома } q = \int_1^2 c dT, \text{ [Дж/кг];}$$

повна $Q = qm$, Дж [кДж, МДж].

При $T = \text{const}$ змінення внутрішньої енергії відсутнє ($\Delta u = \int_1^2 du = \int_1^2 c_v dt = 0$), тому з рівняння першого закону

термодинаміки для закритої системи ($m = \text{const}$) $dq = du + d\ell$ виходить, що $dq = d\ell$,

$$\text{тобто } q_T = \ell_T = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_1^2 RT \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1}, \text{ [Дж/кг].}$$

Визначення змінення ентальпії газу за загальною формулою:

$$\text{питоме } \Delta h = c_p (T_2 - T_1), \text{ [Дж/кг];}$$

повне $\Delta H = \Delta h \cdot m$, Дж [кДж, МДж].

Розрахування наявної роботи за загальною формулою:

$$\text{питома } \ell_0 = - \int_{p_1}^{p_2} v dp, \text{ [Дж/кг];}$$

повна $L_0 = \ell_0 \cdot m$, Дж [кДж, МДж].

$$\text{При } T = \text{const} \quad \ell_{0(T)} = \ell_{(T)};$$

$$\text{при } s = \text{const} \quad \ell_{0(s)} = k \cdot \ell_{(s)};$$

$$\text{при } c = \text{const} \quad \ell_{0(c)} = n \cdot \ell_{(c)}.$$

Визначення змінення ентропії за загальною формулою:

питоме $\Delta s = \int_1^2 \frac{dq}{T}$, [Дж/(кг·К)];

повне $\Delta S = \Delta s \cdot m$, [Дж/К].

Визначення часток теплоти, що витрачаються на змінення внутрішньої енергії ϕ та здійснення механічної роботи ψ :

$$\phi = \frac{\Delta u}{q} = \frac{\Delta U}{Q} \quad \text{та} \quad \psi = \frac{l}{q} = \frac{L}{Q}.$$

- скласти схему енергетичного балансу (енергетичних перетворень) згідно з першим законом термодинаміки для закритої системи

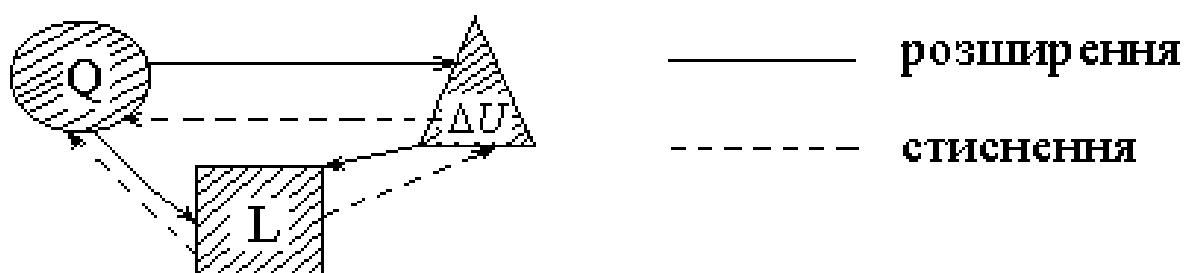


Рисунок 1.1 – Схема енергобалансу

Якщо значення енергетичної складової балансу дорівнює нулю, тоді відповідна геометрична фігура не заштриховується, лінія зв'язку між нею та іншими складовими відсутня;

- графічно зобразити перебіг досліджуваних процесів на Vp - та sT – діаграмах на міліметровому папері;
- скласти зведену таблицю результатів розрахунку (таблиця 1.2);

Таблиця 1.2 – Зведена таблиця результатів розрахунку

Процес	p_2 , Па	T_2 , К	ΔU , Дж	L , Дж	Q , Дж	ΔH , Дж	L_0 , Дж	ΔS , Дж/К	c , Дж/кгК	ψ	ϕ
$T = \text{const}$	10^6	293	0			0				1	0
$S = \text{const}$					0			0	0	–	–
$c = \text{const}$											

- провести порівняльний аналіз одержаних результатів та встановити найбільш енергетично вигідний (з досліджених) процесів.

Інженерне рішення: досліджений політропний процес належить до ... групи процесів стискування (розширювання). На практиці здійснення процесу відбувається Найбільш енергетично вигідним процесом є ... процес, тому що

Відповісти письмово на контрольні запитання № 1 – 13.

1.2 Задача 2. Визначення термодинамічних параметрів у характерних точках циклу та енергетичних характеристик ДВЗ, що працює за циклом з сумісним підведенням теплоти при сталому об'ємі і тиску (циклом Трінклера) (для спеціальності 133)

Двигуни внутрішнього згорання відносять за класифікацією теплових машин до теплових двигунів. Термодинамічний аналіз роботи теплових двигунів як в цілому і теплових машин полягає в оцінюванні їхньої ефективності для подальшого розкриття можливостей її підвищення.

Умови задачі. Для ідеального циклу поршневого двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) із змішаним підведенням теплоти (цикл Трінклера) задані параметри робочого тіла на початку стиснення p_1 і t_1 . Також задані ступінь стиску $\varepsilon = v_1/v_2$; ступінь підвищення тиску $\lambda = p_3/p_2$; ступінь попереднього розширення $\rho = v_4/v_3$. Робочим тілом є повітря, що вважається за ідеальний газ, маса якого дорівнює 1 кг.

Значення абсолютного тиску p_1 і температури t_1 робочого тіла на початку адіабатного стискування визначити за останньою цифрою шифру, значення параметрів циклу ε , λ , ρ – за передостанньою цифрою шифру з табл. 1.3.

Вимоги до розв'язання задачі. Визначити параметри робочого тіла у характерних точках циклу, кількість наданої та відведеної теплоти, корисну роботу і термічний к.к.д. циклу.

Скласти зведену таблицю результатів розрахунку. Провести порівняльний аналіз одержаних результатів. Зобразити цикл на p - та s - T – діаграмах.

Таблиця 1.3 – Вихідні дані

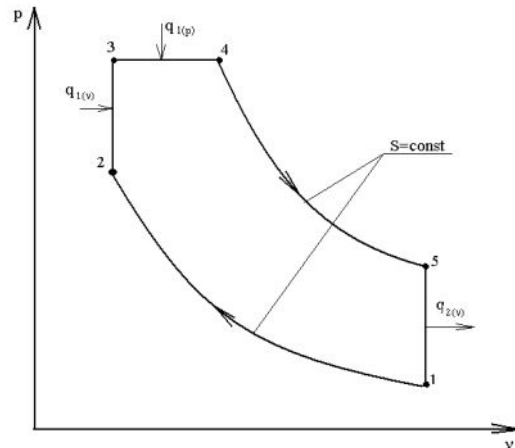
Шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_1 , бар	0,96	0,98	1,0	1,02	1,01	0,99	0,97	0,95	0,96	0,98
t_1 , °C	5	15	25	35	30	20	10	7	17	27
ε	8,0	8,2	8,5	8,7	9,0	8,8	8,6	8,4	7,5	7,0
λ	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	1,4	1,5	1,6	1,7
ρ	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,75	1,65	1,55	1,45	1,35

Послідовність виконання задачі. Визначення властивості робочого тіла, яким є повітря ($R_{\text{пов}} = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$). Оскільки повітря є сумішшю двоатомних газів, то за умов, що показник адіабати не залежить від температури, тобто $k = 1,4$, можна розрахувати величини теплоємностей:

$$\text{ізохорної } c_v = \frac{R}{k-1}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$\text{ізобарної } c_p = k \cdot c_v = \frac{k \cdot R}{k-1}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Схематично зобразити цикл у p - v координатах з описом перебігу окремих процесів та позначенням напрямку (рис.1.2).

Рисунок 1.2 – Схема циклу на p - v -діаграмі

Визначення параметрів робочого тіла в характерних точках циклу. Точка 1 (початок адіабатного стискування повітря):

відомі параметри: p_1 , бар = 10^5 Па; $T_1 = (t_1 + 273,15)$, К,
тоді питомий об'єм:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1}, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Точка 2 (процес 1-2 адіабатного стискування супроводжується зростанням тиску і температури):

питомий об'єм (за відомим ступенем стиску ε):

$$v_2 = v_1 / \varepsilon, \text{ м}^3/\text{кг}$$

тиск і температура з рівнянь адіабати:

$$p \cdot v^k = \text{const}; \quad T \cdot v^{k-1} = \text{const},$$

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = \varepsilon^k \cdot p_1, \text{ Па};$$

$$\text{тобто} \quad T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \cdot T_1, \text{ К.}$$

Точка 3 (2 - 3 процес ізохорного підведення теплоти):

питомий об'єм $v_3 = v_2, \text{ м}^3/\text{кг}$;

тиск та температура з рівняння ізохори:

$$p/T = \text{const},$$

$$\text{або} \quad \frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda,$$

$$\text{тобто} \quad p_3 = \lambda \cdot p_2, \text{ Па};$$

$$T_3 = \lambda \cdot T_2, \text{ К.}$$

Точка 4 (3-4 процес ізобарного підведення теплоти):

тиск $p_4 = p_3, \text{ Па}$;

питомий об'єм і температура з рівняння ізобари:

$$v/T = \text{const},$$

$$\text{або} \quad \frac{v_4}{v_3} = \frac{T_4}{T_3} = \rho,$$

$$\text{тобто} \quad v_4 = \rho \cdot v_3, \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_4 = \rho \cdot T_3, \text{ К.}$$

Точка 5 (процес 4-5 адіабатного розширення супроводжується зниженням тиску і температури):

питомий об'єм

$$v_5 = v_1, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

(процес 5-1 ізохорного відведення теплоти).

Тиск і температура з рівнянь адіабати,

$$p_5 = p_4 \cdot \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k = p_4 \cdot \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^k, \text{ Па};$$

$$\text{тобто} \quad T_5 = T_4 \cdot \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1} = T_4 \cdot \left(\frac{v_4}{v_1} \right)^{k-1}, \text{ К}.$$

Змінення питомої ентропії для характерних точок циклу відносно 0 (нормальні фізичні умови) визначається за загальною формулою ($i = 1, 2, \dots, 5$), Дж/(кг·К)

$$\Delta s_{i-0} = c_v \cdot \ln \frac{T_i}{T_0} + R \cdot \ln \frac{v_i}{v_0}$$

$$\text{або} \quad \Delta s_{i-0} = c_p \cdot \ln \frac{T_i}{T_0} - R \cdot \ln \frac{p_i}{p_0},$$

де $T_0 = 273,15 \text{ К}$; $p_0 = 101325 \text{ Па}$.

Змінення питомої ентропії в процесах надання та відведення теплоти, Дж/(кг·К)

$$\Delta s_{3-2} = c_v \cdot \ln \frac{T_3}{T_2};$$

$$\Delta s_{4-3} = c_p \cdot \ln \frac{T_4}{T_3};$$

$$\Delta s_{1-5} = c_v \cdot \ln \frac{T_1}{T_5}.$$

$$\text{Перевірка:} \quad \Delta s_{5-0} = \Delta s_{1-0} + \Delta s_{3-2} + \Delta s_{4-3}; \quad \Delta s_{1-5} = \Delta s_{3-2} + \Delta s_{4-3}$$

Визначення енергетичних характеристик циклу. Теплота, яка надається робочому тілу в циклі:

$$q_1 = q_{1(v)} + q_{1(p)} = c_v \cdot (T_3 - T_2) + c_p \cdot (T_4 - T_3), \text{ Дж/кг}.$$

Теплота, що відводиться від робочого тіла:

$$q_2 = q_{2(v)} = c_v \cdot (T_1 - T_5), \text{ Дж/кг}.$$

Теплота, яка корисно використовується в циклі:

$$q_{\text{ц}} = q_1 - |q_2|, \text{ Дж/кг}.$$

Змінення внутрішньої енергії в циклі відсутнє:

$$\Delta U = 0,$$

тому, що робоче тіло, здійснивши цикл, має параметри, відповідні первісним значенням (p_1 , t_1). Згідно з першим законом термодинаміки для закритої термодинамічної системи:

$$q_{\text{ц}} = l_{\text{ц}} = q_1 - |q_2|,$$

де робота циклу є різницею робіт розширення і стискування:

$$l_{\text{ц}} = l_{\text{розш}} - |l_{\text{ст}}| = l_{3-4} + l_{4-5} - |l_{1-2}|.$$

Робота попереднього розширення:

$$l_{3-4} = p_3 \cdot (v_4 - v_3) = R \cdot (T_4 - T_3), \text{ Дж/кг.}$$

Робота адіабатного розширення:

$$l_{4-5} = \frac{R}{k-1} \cdot (T_4 - T_5), \text{ Дж/кг.}$$

Робота адіабатного стиснення:

$$l_{1-2} = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2), \text{ Дж/кг.}$$

Перевірка: $q_{\text{ц}} = l_{\text{ц}}$.

Термічний к.к.д. теплового двигуна визначається за загальною формулою:

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} \quad \text{або} \quad \eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1}.$$

Термічний к.к.д. циклу Трінклера:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \cdot \lambda \cdot (\rho - 1)}.$$

Термічний к.к.д. циклу ДВЗ, визначений через середні значення інтервалів температур.

Середня температура процесів надання теплоти:

$$\overline{T_{\text{max}}} = \frac{T_4 - T_2}{\ln(T_4/T_2)}, \text{ К.}$$

Середня температура процесу відведення теплоти:

$$\overline{T_{\text{min}}} = \frac{T_5 - T_1}{\ln(T_5/T_1)}, \text{ К.}$$

Термічний к.к.д. циклу:

$$\bar{\eta}_t = 1 - \frac{\overline{T_{\min}}}{\overline{T_{\max}}}.$$

Термічний к.к.д. циклу Карно для даних температур:

$$\eta_k = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}.$$

Складається зведена таблиця результатів розрахунку (табл.1.4).

Таблиця 1.4 – Зведена таблиця результатів розрахунку

Характерні точки циклу	Параметри (функції) стану				Енергетичні характеристики	
	v, м ³ /кг	p, бар	T, К	Δs, Дж/(кг·К)		
0					q ₁ , кДж/кг	
1					q ₂ , кДж/кг	
2					q _ц , кДж/кг	
3					l _ц , кДж/кг	
4					$\bar{\eta}_t$	
5					η_t	

За результатами розрахунків на міліметровому папері (в обраному масштабі) зображується цикл у *vp*- та *sT*-координатах (рисунки 1.2 і 1.3).

Робиться порівняльний аналіз к.к.д. дослідженого циклу із к.к.д. циклів Карно та існуючих ДВЗ (карбюраторного і дизельного). Приймається *інженерне рішення* щодо показників (параметрів) циклу ДВЗ, ефективності, економічності, екологічності роботи ДВЗ.

Відповісти письмово на контрольні запитання №№ 14 ... 19.

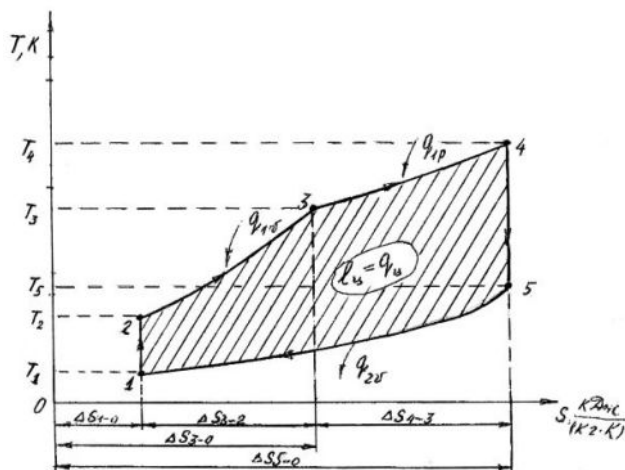


Рисунок 1.3 – Схема циклу на sT-діаграмі

1.3 Задача 2. Аналіз термодинамічних процесів стискування газів у поршневому компресорі (для спеціальності 136)

Для стиску та нагнітання (переміщення) повітря та інших газів призначені компресори, які виробляють стиснені гази (повітря, аміак, двоокис вуглецю та інші) із кінцевим тиском до 5,0 МПа. За принципом дії відрізняють поршневі (об'ємні) і лопатеві (турбо) компресори.

У поршневих компресорах, які широко розповсюджені в промисловому виробництві, підвищення тиску здійснюється за рахунок зменшення об'єму замкнутого простору порожнини, в якій міститься газ, наприклад, переміщенням поршня в циліндрі.

Характерна особливість цих машин – періодичність робочого процесу. Компресорна машина являє собою відкриту термодинамічну систему, яка поєднана із довкіллям системою клапанів.

Умови задачі. Односхідчастий поршневий компресор стискує повітря при температурі всмоктування t_1 , $^{\circ}\text{C}$. При цьому тиск збільшується від p_1 , бар до p_2 , МПа. Діаметр циліндра компресора $D = 0,3$ м. Хід поршня $S = 0,4$ м; відносний об'єм шкідливого простору $a = 0,05$; коефіцієнт, що враховує зменшення тиску повітря при всмоктуванні $\eta_p = 0,94$; ефективний адіабатний ККД $\eta_{\text{е.ад}} = 0,75$; показник політропи розширення залишків повітря у мертвому просторі $m' = 1,3$.

Термодинамічні параметри t_1 , p_1 , p_2 обираються за останньою цифрою шифру; частота обертання ω та показник політропи

стискування повітря n – за передостанньою. Вихідні дані наведені в таблиці 1.5.

При дослідженні повітря вважається за ідеальний газ з показником адіабати k , який не залежить від температури.

Таблиця 1.5 – Вихідні дані

Шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	7	12	17	22	27	30	25	20	15	10
p_1 , бар	0,96	0,98	1,0	1,02	1,04	1,03	1,01	0,99	0,97	0,95
p_2 , МПа	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,78	0,73	0,68	0,63	0,58
ω, c^{-1}	12	14	16	18	20	19	17	15	13	11
n	1,14	1,16	1,18	1,20	1,22	1,19	1,17	1,15	1,13	1,24

Вимоги до розв'язання задачі. Визначити об'єм циліндра компресора, ступінь підвищення тиску; об'ємний ККД і коефіцієнт подачі компресора; теоретичну і дійсну подачі компресора.

Провести дослідження ізотермічного, адіабатного та політропного стискування газу в компресорі.

Побудувати індикаторну pV -діаграму поршневого компресора для заданих процесів з урахуванням шкідливого простору (залишків газу).

Скласти зведену таблицю результатів розрахунку.

Провести порівняльний аналіз результатів та встановити енергетично найбільш вигідний термодинамічний процес стиснення газу в компресорі, умови його забезпечення, а також необхідність (у разі потреби) підвищення тиску газу при стискуванні в багатосхідчастому компресорі.

Послідовність виконання задачі.

Об'єм циліндра компресора:

$$V_1 = V_m + V_h ,$$

де

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot S}{4} - \text{корисний об'єм,}$$

$V_m = a \cdot V_h$ – об'єм шкідливого простору.

Остаточнo: $V_1 = V_h \cdot (1 + a)$, м³.

Ступінь підвищення тиску:

$$\lambda = \frac{p_2}{p_1}.$$

Об'ємний ККД компресора:

$$\eta_{об} = 1 - a \cdot (\lambda^{1/m'} - 1).$$

Коефіцієнт подачі компресора:

$$\eta_v = \eta_{об} \cdot \eta_p.$$

Маса стисненого повітря за один цикл компресора:

$$m_{ц} = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1}, \text{ кг.}$$

Масова теоретична подача компресора:

$$G_T = m_{ц} \cdot \omega, \text{ кг/с.}$$

Дійсна подача:

$$G_d = G_T \cdot \eta_v, \text{ кг/с.}$$

Ізотермічне стиснення повітря ($pV = \text{const}$).

Кінцеві параметри:

температура $T_2 = T_1$, К,

об'єм $V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2} = \frac{V_1}{\lambda}$, м³.

Питома теоретична робота, що витрачається приводом на стискування:

$$l_{пр(T)} = R \cdot T_1 \cdot \left| \ln \frac{p_1}{p_2} \right| = R \cdot T_1 \cdot \ln \lambda, \text{ Дж/кг.}$$

Теоретична потужність привода:

$$N_{теор(T)} = G_T \cdot l_{пр(T)}, \text{ Вт.}$$

Дійсна потужність:

$$N_{(T)} = \frac{N_{теор(T)}}{\eta_{із}}, \text{ Вт.}$$

Питома кількість теплоти, що відводиться від газу при його стискуванні:

$$q_{\text{теор}(T)} = l_{\text{пр}(T)} = R \cdot T_1 \cdot \ln \lambda, \text{ Дж/кг.}$$

Адіабатне стиснення повітря ($q = 0$).

Кінцеві параметри:

$$\text{з рівняння} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \lambda^{\frac{k-1}{k}} = \lambda^{1-\frac{1}{k}};$$

$$\text{температура} \quad T_2 = T_1 \cdot \lambda^{\left(1-\frac{1}{k}\right)}, \text{ К};$$

з рівняння адіабати:

$$\text{об'єм} \quad V_2 = V_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = V_1 \cdot \lambda^{\frac{-1}{k}}, \text{ м}^3.$$

Питома теоретична робота привода:

$$l_{\text{пр}(S)} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(\lambda^{\frac{(k-1)}{k}} - 1 \right), \text{ Дж/кг.}$$

Теоретична потужність привода:

$$N_{\text{теор}(S)} = G_T \cdot l_{\text{пр}(S)}, \text{ Вт.}$$

Дійсна потужність:

$$N_{(S)} = \frac{N_{\text{теор}(S)}}{\eta_{\text{ад}}}, \text{ Вт.}$$

Теплообмін відсутній: $q = 0$.

Політропне стиснення повітря ($c = \text{const}$).

Кінцеві параметри:

$$\text{температура} \quad T_2 = T_1 \cdot \lambda^{\left(1-\frac{1}{n}\right)}, \text{ К};$$

$$\text{об'єм} \quad V_2 = V_1 \cdot \lambda^{\frac{-1}{n}}, \text{ м}^3.$$

Питома теоретична робота привода:

$$l_{\text{пр}(c)} = \frac{n}{n-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left(\lambda^{\frac{(n-1)}{n}} - 1 \right), \text{ Дж/кг.}$$

Теоретична потужність привода:

$$N_{\text{теор}(c)} = G_T \cdot l_{\text{пр}(c)}, \text{ Вт.}$$

Дійсна потужність:

$$N_{(c)} = \frac{N_{\text{теор}(c)}}{\eta_{\text{пол}}}, \text{ ВТ.}$$

Питома кількість теплоти, що відводиться від газу при його стискуванні:

$$q_c = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) , \text{ Дж/кг.}$$

Таблиця 1.6 – Зведена таблиця результатів розрахунку

Процес	T_2, K	V_2, m^3	$l_{пр(теор)},$ кДж/кг	$N_{теор},$ кВт	$N_{д},$ кВт	$q,$ кДж/кг
$T = const$						
$S = const$						
$c = const$						

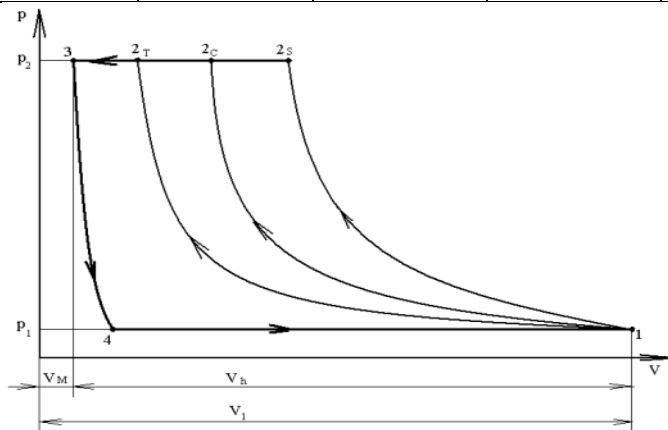


Рисунок 1.4 – Індикаторна pV-діаграма поршневого компресора,

$$\text{де } V_3 = V_M, V_4 = V_3 \cdot \lambda^{m'}$$

З рівняння політропи для залишкового газу: $\frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{m'}$.

Графічно зобразити (рисунок 1.4) індикаторну діаграму ізотермічного, адіабатного та політропного процесів стискування повітря у масштабі на міліметровому папері.

Встановити за величинами $l_{пр}$ та $N_{пр}$ енергетично найбільш економічний термодинамічний процес стискування газу у компресорі.

Прийняти *інженерне* рішення.

Примітка. Для обґрунтованого прийняття інженерного рішення треба звернути увагу на те:

а) з підвищенням тиску нагнітання p_2 , подача і об'ємний ККД односхідчастого компресора зменшуються і на межі можуть дорівнювати нулеві, тому:

б) односхідчасті компресори непридатні для створення високих тисків;

в) другою, не менш важливою причиною обмеження підвищення тиску газу в одному східці компресора є неприпустимість високої температури в кінці стиснення. Підвищення температури газу більш ніж $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ погіршує умови змащення циліндра компресора (відбувається коксування мастила), а в деяких випадках може призвести до самозаймання розпиленої та змішаної з повітрям мастильної речовини.

Для одержання стиснених газів більш високого тиску ($\lambda \geq 10 \dots 12$) використовують багатосхідчасті компресори з примусовим охолодженням газу після кожного східця.

Відповісти письмово на контрольні запитання № 14 – 19.

1.4 Контрольні запитання

1.4.1 Якими параметрами характеризується стан газу і які одиниці вимірювання цих параметрів в системах SI?

1.4.2 Що називається кіломолом газу, молекулярною масою газу?

1.4.3 Записати характеристичне рівняння стану ідеального газу для 1 кг, m кг, 1 моля, m молей.

1.4.4 Яка фізична суть газової сталої? Обчислити її значення для повітря, кисню і вуглекислого газу.

1.4.5 Яке формулювання і математичний вираз першого закону термодинаміки?

1.4.6 Які основні формулювання другого закону термодинаміки?

1.4.7 Поняття термодинамічного процесу. Основні процеси. Навести їхні характеристики.

1.4.8 Політропний процес. Які характерні значення показника політропи для основних термодинамічних процесів?

1.4.9 Як змінюється і на що витрачається внутрішня теплова енергія газу в ізохорному та адіабатному процесах?

1.4.10 Чому теплоємність газу в процесі при сталому тиску завжди більше теплоємності газу при сталому об'ємі?

1.4.11 Визначити значення теплоємностей газу в різних термодинамічних процесах. Фізична суть від'ємної теплоємності.

1.4.12 Зобразити основні термодинамічні процеси в pV -, Ts -координатах. Написати рівняння цих процесів.

1.4.13 За якими рівняннями визначається зміна ентропії в ізохорному, ізотермічному, адіабатному і політропному процесах?

1.4.14 Як залежить робота привода компресора від показника політропи стиску?

1.4.15 Як впливає об'єм мертвого (шкідливого) простру на продуктивність компресора?

1.4.16 Як впливає показник політропи стиску на кінцеву температуру газу в односхідчастому компресорі?

1.4.17 Зобразити цикли двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) в pV -, Ts - координатах з підведенням теплоти в процесах при сталому об'ємі, при сталому тиску і в процесах сумісного підведення теплоти при сталих об'ємі і тиску. Написати формули ККД циклів ДВЗ. Які існують методи підвищення термічного ККД циклів ДВЗ?

1.4.18 Зобразити цикл Карно в pV -, Ts -діаграмах. Написати вираз для термічного ККД циклу Карно.

1.4.19 Зобразити схеми і цикли реактивних двигунів в pV -, Ts -координатах.

2 РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ №2

Конвективний теплообмін. Теплопередача

2.1 Задача 1. Розрахунок та графічне зображення процесів конвективного теплообміну в технологічних системах (для спеціальності 133)

Конвективний теплообмін є складний процес, який залежить від багатьох факторів та параметрів, що визначають цей процес. Серед них найбільш впливові: природа руху середовища (вільна або вимушена); режим руху середовища (ламінарний, турбулентний або невизначений); теплофізичні властивості середовища (λ , c , ρ , α , ν); форма та розміри твердого тіла, яке обтікається середовищем (визначальний розмір l); температура потоку середовища $t_{\text{сер}}$ і поверхні твердого тіла $t_{\text{пов}}$; визначальна температура t_m .

Умови задачі. У вузлах двигунів внутрішнього згорання або транспортних засобів в цілому відбувається примусове повітряне та

водяне охолодження поверхонь твердих тіл. Форму поверхні твердого тіла визначити за останньою цифрою шифру таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	2a	2b	2c	2d	2e	2a	2b	2c	2d	2e

Обрати варіант розрахунків з таблиці 2.2.

Значення швидкості потоку W та температур поверхні $t_{\text{пов}}$ і середовища $t_{\text{сер}}$ під час вимушеної течії прийняти за передостанньою цифрою шифру з таблиці 2.3.

Фізичні властивості повітря та води обирати з додатку А.1 і А.2 відповідно.

Вимоги до розв'язання задачі. Схематично зобразити фізичну модель конвективного теплообміну за умов вимушеного руху середовища відповідно варіанту завдання.

Визначити для обох випадків (при охолодженні поверхні повітрям та водою) коефіцієнт тепловіддачі конвекцією $\alpha_{\text{конв}}$.

Провести порівняльний аналіз одержаних результатів розрахунку та прийняти інженерне рішення.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані

Варіант	Форма поверхні	Розмір, мм
2a	Течія середовища в циліндричній трубі	$l = 100$
2b	Течія середовища в кільцевому каналі	$D = 31$ $d = 28$
2c	Течія середовища в трубі прямокутного перерізу	$a = 10$ $b = 70$
2d	Течія середовища вздовж пластини	$l = 250$
2e	Поперечне обтікання циліндричної труби середовищем	$D = 15$

Таблиця 2.3 – Вихідні дані

Шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Повітря										
$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	90	100	120	90	100	120	90	100	120	70
$t_{\text{сер}}, ^\circ\text{C}$	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30
$W, \text{м/с}$	15	25	10	20	10	25	5	30	15	10
Вода										
$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	90	100	120	90	100	120	90	100	120	70
$t_{\text{сер}}, ^\circ\text{C}$	40	70	85	85	40	70	70	85	40	30
$W, \text{м/с}$	3	7	5	8	2	4	7	8	3	4

Послідовність виконання задачі.

Зобразити графічно схему процесу.

Визначити визначальні розмір l , м та температуру $t_m, ^\circ\text{C}$.

З довідникового матеріалу (додаток А) визначити теплофізичні властивості середовища (коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К); кінематичний коефіцієнт в'язкості ν , м²/с; коефіцієнт теплового об'ємного розширювання $\beta = 1/(t_m + 273)$, К⁻¹) при визначальній температурі $t_m, ^\circ\text{C}$. Також з таблиць додатку А визначити числове значення критерію Прандтля (Pr).

Розрахувати числове значення критерію Рейнольдса:

$$Re = w \cdot \ell / \nu,$$

а також критерію Грасгофа:

$$Gr = g\beta(\Delta T/\nu^2) \cdot \ell^3.$$

Визначити числові значення емпіричного коефіцієнту С за умов вихідних даних та показників степені m , n , p .

Записати критеріальне рівняння для вимушеного конвективного теплообміну:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot Gr^p (Pr/Pr_{\text{пов}})^{0.25},$$

де $Pr_{\text{пов}}$ – значення критерію Прандтля для середовища при температурі поверхні.

Визначити числове значення критерія Нуссельта Nu з критеріального рівняння для вимушеного конвективного теплообміну.

Визначити з критерію Нуссельта $Nu = (\alpha_{\text{конв}} \cdot \ell) / \lambda$ значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією $\alpha_{\text{конв}}$.

Встановити умови інтенсивності вимушеного конвективного теплообміну, враховуючи, що в газах можливі значення:

у повітрі $\alpha_{\text{конв}} = 10 \dots 500, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$,

у воді $\alpha_{\text{конв}} = 500 \dots 10^4, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Провести порівняльний аналіз результатів розрахунку, керуючись фізичною моделлю та величиною $\alpha_{\text{конв}}$ та прийняти інженерне рішення.

Відповісти письмово на контрольні запитання № 1 – 10.

2.2 Задача 2. Дослідження теплопровідності крізь плоску багат шарову стінку при стаціонарному режимі (для спеціальності 136)

Теплопровідність – процес перенесення теплоти мікро-частинками в газах, рідинах або твердих тілах внаслідок різниці температур.

Теплопровідність може бути *стаціонарною* і *нестационарною*. Остання відрізняється від першої тим, що за її умов температура в твердому тілі змінюється за часом.

Умови задачі. Теплота переноситься крізь плоску багат шарову стінку при стаціонарному режимі. Температура внутрішньої поверхні $t_{\text{пов1}} = 1300 \text{ } ^\circ\text{C}$, температура зовнішньої поверхні $t_{\text{пов2}} = 100^\circ\text{C}$, товщина першого шару δ_1 , другого – δ_2 , третього – δ_3 , мм. Коефіцієнти тепло-провідності відповідно $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Чисельні значення $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, мм приймати за останньою цифрою шифру з таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Вихідні дані

Остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
δ_1 , мм	230	80	70	150	50	250	200	100	120	110
δ_2 , мм	115	50	40	80	30	200	100	70	20	15
δ_3 , мм	100	30	50	60	70	150	40	3	4	90

Чисельні значення $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ приймати за перед-останньою цифрою з таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Вихідні дані

Перед- остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_1, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,82	0,88	0,71	1,76	58,0	4,23	2,8	1,3	2,62	3,14
$\lambda_2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	1,58	1,04	0,465	2,1	6,28	5,1	4,1	2,1	3,7	7,9
$\lambda_3, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,7	1,75	0,84	28,0	1,86	1,05	4,17	37,1	5,42	1,79

Вимоги до розв'язання задачі. Зобразити графічно схему процесу.

Визначити втрати теплоти у зовнішнє середовище за дві години крізь 5 м^2 тришарової стінки; значення температур на границях шарів стінки (t_2, t_3).

Зобразити графічно розподіл температури у шарах стінки.

Провести порівняльний аналіз одержаних результатів за умов вихідних даних та зміни матеріалів першого і третього шару стінки.

Відповісти письмово на контрольні запитання № 1 – 10.

Послідовність виконання задачі.

Зобразити графічно схему процесу теплопровідності крізь плоску тришарову стінку (рисунк 2.1).

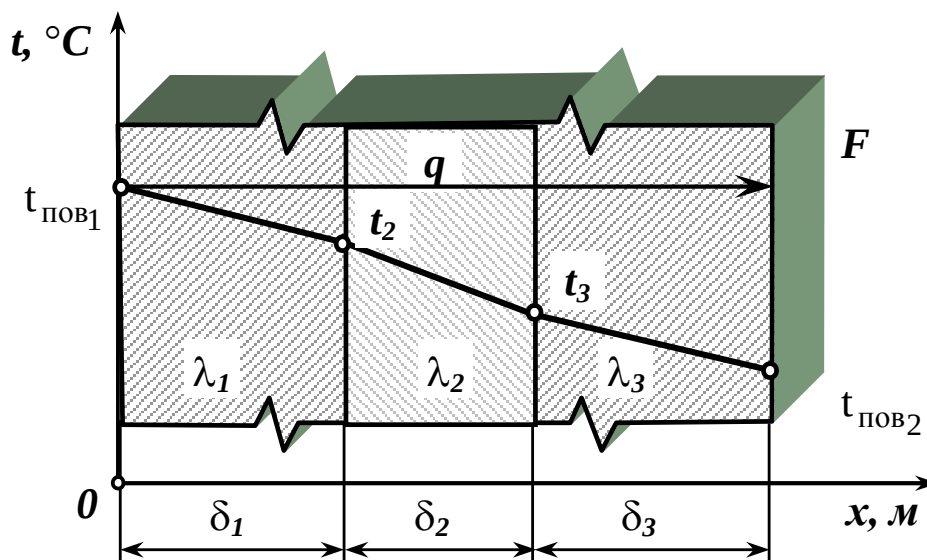


Рисунок 2.1 – Схема процесу теплопровідності крізь плоску тришарову стінку

Згідно із законом Біо-Фур'є при стаціонарному режимі питомий тепловий потік для всіх шарів стінки буде однаковим і визначатиметься за рівняннями:

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{\text{пов}_1} - t_2);$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_2 - t_3);$$

$$q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_3 - t_{\text{пов}_2}),$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, і $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – відповідно коефіцієнти теплопровідності та товщини шарів стінки.

Зміна температури в кожному шарі:

$$t_{\text{пов}_1} - t_2 = q \frac{\delta_1}{\lambda_1};$$

$$t_2 - t_3 = q \frac{\delta_2}{\lambda_2};$$

$$t_3 - t_{\text{пов}_2} = q \frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

Звідки питомий тепловий потік дорівнюватиме:

$$q = \frac{t_{\text{пов}_1} - t_{\text{пов}_2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}, \text{ Вт/м}^2.$$

Тоді втрати теплоти у зовнішнє середовище:

$$Q_{\text{вт}} = q \cdot F \cdot \tau, \text{ Дж.}$$

2.3 Задача 3. Дослідження теплопередачі крізь плоску стінку. Інтенсивність теплопередачі (для всіх спеціальностей)

Теплопередача – це процес переносу теплоти від теплоносія (потіку газу або рідини) до тепловбирача (потіку газу або рідини з температурою меншою ніж теплоносії) крізь проміжну тверду стінку (оболонку) довільної геометричної конфігурації (плоску, циліндричну, сферичну).

Теплопередача – складний фізичний процес, який залежить від багатьох факторів та параметрів, що визначають величину коефіцієнта теплопередачі k , Вт/(м²·К). Тобто k – не є фізичною властивістю процесу та характеризує його інтенсивність; значення k визначаються виключно розрахунковим шляхом.

Коефіцієнти α_1 і α_2 можуть характеризувати конвективну тепловіддачу (тоді $\alpha_1 = \alpha_{\text{конв1}}$, $\alpha_2 = \alpha_{\text{конв2}}$), тепловіддачу випромінюванням (тоді $\alpha_1 = \alpha_{\text{випр1}}$, $\alpha_2 = \alpha_{\text{випр2}}$; якщо теплоносієм або тепловирачем є рідина, тоді $\alpha_{\text{випр1}}$, $\alpha_{\text{випр2}}$ дорівнюють нулеві) або сумарну, тобто радіаційно-конвективну тепловіддачу (конвекцію і випромінювання, тоді $\alpha_1 = \alpha_{\Sigma_1}$, $\alpha_2 = \alpha_{\Sigma_2}$).

Умови задачі. Плоска сталена стінка товщиною $\delta_{\text{ст}}$ обтікає з одного боку гарячими газами (теплоносієм) з температурою $t_{\text{н}}$, °С, а з другого – водою (тепловирачем) з температурою $t_{\text{в}}$, °С.

Коефіцієнти тепловіддачі від газу до стінки α_{Σ_1} та від стінки до води α_{Σ_2} ; коефіцієнт теплопровідності стінки $\lambda_{\text{ст}} = 50$ Вт/(м·К).

У процесі експлуатації стінка покривається шаром накипу товщиною $\delta_{\text{ш}}$, коефіцієнт теплопровідності накипу $\lambda_{\text{ш}} = 1$ Вт/(м·К). Чисельні значення α_{Σ_1} та α_{Σ_2} , Вт/(м²·К) визначити за останньою цифрою шифру з таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Вихідні дані

Шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_{Σ_1} , Вт/(м ² ·К)	32	35	38	40	42	45	34	37	41	44
α_{Σ_2} , Вт/(м ² ·К)	3200	3600	3000	4000	4300	4600	4200	4500	4800	5000

Чисельні значення $\delta_{\text{ст}}$ і $\delta_{\text{ш}}$, а також температур $t_{\text{н}}$ та $t_{\text{в}}$ визначити за передостанньою цифрою шифру з таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Вихідні дані

Шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta_{\text{ст}}$, мм	14	16	18	20	22	15	17	19	21	23
$\delta_{\text{ш}}$, мм	0,7	0,9	0,8	1,2	1,4	1,0	1,6	1,8	1,7	1,63
$t_{\text{н}}$, °С	900	750	890	800	820	950	790	830	840	850
$t_{\text{в}}$, °С	105	110	120	115	125	130	100	105	110	115

Вимоги до розв'язання задачі. Визначити коефіцієнт теплопередачі k від газу до води, питомий тепловий потік q та температури обох поверхонь стінки $t_{\text{пов}1}$ та $t_{\text{пов}2}$ у відсутності і при наявності шару накипу.

Відобразити графічно розподіл температур від t_n до t_v для обох випадків на міліметровому папері.

Пояснити фізичну суть накладення теплової ізоляції та її значення, наприклад, у виді накипу на металевих поверхнях.

Послідовність виконання задачі.

Зобразити графічно схему процесу теплопередачі крізь плоску одношарову стінку необмеженої довжини при відсутності шару накипу (режим стаціонарний).

Розбити схему процесу на етапи. Скласти систему рівнянь на підставі аналітичних виразів законів Біо-Фур'є та Ньютона-Ріхмана для кожного етапу:

$$q = \alpha_{\Sigma_1} (T_n - T_{\text{пов}1})$$

$$q = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta_{\text{ст}}} (T_{\text{пов}1} - T_{\text{пов}2})$$

$$q = \alpha_{\Sigma_2} (T_{\text{пов}2} - T_v).$$

При зображенні схеми процесу треба враховувати, що завжди при русі середовища з будь-якою швидкістю біля твердої поверхні утворюється відповідної товщини (δ_1 , δ_2) пристінний шар цього середовища; саме ці шари середовища ліворуч і праворуч стінки чинять опір перенесенню теплоти: від теплоносія до стінки $1/\alpha_{\Sigma_1}$ і від стінки до тепловбирача $1/\alpha_{\Sigma_2}$. На рисунку 2.2 наведено схему теплопередачі крізь плоску одношарову тверду стінку необмеженої довжини.

Коефіцієнт теплопередачі при відсутності шару накипу:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_{\Sigma_1}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\Sigma_2}} \right)^{-1}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Густина теплового потоку при теплопередачі за цих умов:

$$q = k \cdot (T_n - T_v), \quad \text{Вт}/\text{м}^2.$$

Розв'язуючи систему рівнянь, визначимо температури поверхонь стінки з боку теплоносія $T_{\text{пов}1}$ та з боку тепловбирача $T_{\text{пов}2}$.

Перевірка значень $T_{\text{пов}1}$ та $T_{\text{пов}2}$, що отримані за попередніми розрахунками.

Зобразити графічно схему процесу теплопередачі крізь плоску одношарову стінку необмеженої довжини при наявності шару накипу (режим стаціонарний).

При її зображенні треба враховувати, що біля твердих відкладень (накипу) теж утворюється певної товщини шар середовища, який чинить опір ($1/\alpha_{\Sigma 2}$) перенесенню теплоти.

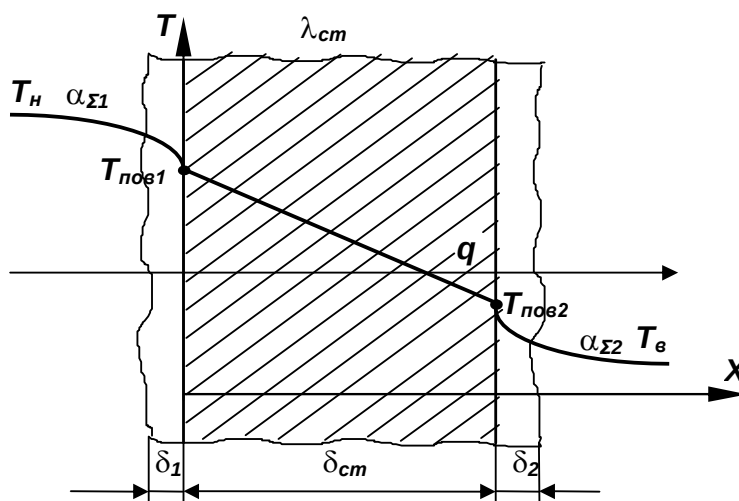


Рисунок 2.2 – Схема теплопередачі крізь плоску одношарову тверду стінку необмеженої довжини

Визначити коефіцієнт теплопередачі та густину теплового потоку при наявності шару накипу з боку тепловбирача, а також температури поверхонь $T_{\text{пов}1}$, $T_{\text{пов}2}$ та температуру зовнішньої поверхні $T_{\text{нак}}$ за цих умов.

Перевірка значень $T_{\text{пов}1}$, $T_{\text{пов}2}$ та $T_{\text{нак}}$, що отримані за попередніми розрахунками.

Побудова розподілу температур в системі для обох випадків на міліметровому папері.

Пояснити фізичну сутність накладення теплової ізоляції та її значення, наприклад, у виді накипу на металевих поверхнях і прийняти інженерне рішення.

Відповісти письмово на контрольні запитання №№ 11 – 17.

2.4 Контрольні запитання

2.4.1 Які існують способи перенесення теплоти і теплообміну? Пояснити фізичну сутність цих явищ.

2.4.2 Поняття теплоти, кількість теплоти, теплового потоку, поверхневої, лінійної, об'ємної густини теплового потоку.

2.4.3 Що таке температурне поле? Стаціонарне і нестаціонарне, одно- та багатовимірне температурне поле.

2.4.4 Закон Ньютона-Ріхмана. Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією $\alpha_{\text{конв}}$, його фізична суть. Які параметри і яким чином впливають на коефіцієнт тепловіддачі конвекцією $\alpha_{\text{конв}}$?

2.4.5 Види і режими руху середовища. Чому при турбулентному режимі тепловіддача конвекцією більш інтенсивна, ніж при ламінарному?

2.4.6 Фізична суть коефіцієнт теплопровідності α .

2.4.7 Що таке критеріальне рівняння, визначальні і визначувальні критерії подібності? Навести вираз критеріїв Nu (Нуссельта), Pr, Gr, Re, Ra, Pe, розкрити їх фізичну суть, вказати види критеріальних рівнянь для вимушеного і вільного конвективного теплообміну.

2.4.8 Що таке визначальна температура і визначальний розмір?

2.4.9 Закон Біо-Фур'є. Розмірність величин, що входять до математичного виразу закону Біо-Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності, його фізична суть.

2.4.10 Чим пояснюється наявність знаку «мінус» у виразі закону Біо-Фур'є?

2.4.11 Де поверхнева густина теплового потоку крізь циліндричну стінку більша: на внутрішній чи на зовнішній поверхні? Чому?

2.4.12 Що таке тепловий опір стінки?

2.4.13 В чому міститься сутність явища теплопередачі? Дати визначення коефіцієнта теплопередачі, його розмірність

2.4.14 Теплопередача крізь плоскі одно- і багат шарову стінки. Вираз коефіцієнта теплопередачі для цих випадків.

2.4.15 Теплопередача крізь циліндричні одно- і багат шарову стінки. Вираз коефіцієнта теплопередачі для цих випадків.

2.4.16 В яких випадках і за рахунок чого можна інтенсифікувати теплопередачу? Яке існує загальне правило інтенсифікації теплопередачі?

2.4.17 Що таке критична товщина ізоляції труби? Що таке критичний діаметр теплової ізоляції і як він визначається?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дудик М.В. Термодинаміка і статистична фізика (курс лекцій): навч. посібник. – Умань: ПП «Жовтий», 2015. – 132 с. – Режим доступу: <https://app.box.com/s/vqu87bh2f705tuwgpruk9pp8q318mr0p6>
2. Єгоров Я.О. Теоретичні основи теплотехніки (у системах машинобудування): /Єгоров Я.О., Беліков С.Б., Улітенко О.М.: Навч. посібник. – Запоріжжя: Дике Поле, 2004. – 286 с.
3. Алабовский А.Н. Техническая термодинамика и теплопередача: / Алабовский А.Н., Недужий И.А.: Учеб. пособие. – К.: Выща шк., 1990. – 255 с.
4. Теплотехніка: підручник для студ. вищих техн. навч. закл. / Б. Х. Драганов [та ін.]; За ред. Б. Х. Драганова. – К. : ІНК ОС, 2005. – 504 с.
5. Гнатишин Я.М. Теплотехніка: / Гнатишин Я.М., Криштапович В.І.: Навч. посібник. – К.: Знання, 2008. – 364 с.
6. Слинько Г.І. Теплотехнічні процеси та теплова обробка матеріалів і виробів: Навч. посібник. / Г.І. Слинько, С.Б. Беліков, О.М. Улітенко – Мелітополь, 2011 – 360 с.
7. Ханик Я.М. Энергозбереження: Ч.1 Термодинаміка. / Ханик Я.М., Гнатишин Я.М.: Навч. посібник. – Львів: Афіша, 2004. – 205 с.
8. Константінов С.М. Технічна термодинаміка [Текст]: підручник / – К.: “Політехніка” НТУУ “КПІ”, 2001. – 368 с.

Додаток А

Таблиця А.1 – Фізичні властивості сухого повітря (тиск $1,013 \cdot 10^5$ Па)

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	53,5	233,7	0,724

Таблиця А.2 – Фізичні властивості води на лінії насичення

t, °C	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	Pr
0	4,212	55,1	1,789	-0,63	13,67
10	4,191	57,4	1,306	0,70	9,52
20	4,183	59,9	1,006	1,83	7,02
30	4,174	61,8	0,805	3,21	5,42
40	4,174	63,5	0,659	3,87	4,31
50	4,174	64,8	0,556	4,49	3,54
60	4,179	65,9	0,478	5,11	2,98
70	4,187	66,8	0,415	5,70	2,55
80	4,195	67,4	0,365	6,32	2,21
90	4,208	68,0	0,326	6,95	1,95
100	4,220	68,3	0,295	7,52	1,75
110	4,233	68,5	0,272	8,08	1,60
120	4,250	68,6	0,252	8,64	1,47
130	4,266	68,6	0,233	9,19	1,36
140	4,287	68,5	0,217	9,72	1,26
150	4,313	68,4	0,203	10,3	1,17
160	4,346	68,3	0,191	10,7	1,10
170	4,380	67,9	0,181	11,3	1,05
180	4,417	67,4	0,173	11,9	1,00
190	4,459	67,0	0,165	12,6	0,96
200	4,505	66,3	0,158	13,3	0,93
210	4,555	65,5	0,153	14,1	0,91
220	4,614	64,5	0,148	14,8	0,89
230	4,681	63,7	0,145	15,9	0,88
240	4,756	62,8	0,141	16,8	0,87
250	4,844	61,8	0,137	18,1	0,86
260	4,949	60,5	0,135	19,7	0,87
270	5,070	59,0	0,133	21,6	0,88
280	5,230	57,4	0,131	23,7	0,90
290	5,485	55,8	0,129	26,2	0,93
300	5,736	54,0	0,128	29,2	0,97
310	6,071	52,3	0,128	32,9	1,03
320	6,574	50,6	0,128	38,2	1,11