

**Міністерство освіти і науки України  
Державний заклад  
«Луганський національний університет  
імені Тараса Шевченка»**

**КОЗУБ Ю. Г., КИРИЧЕВСЬКИЙ Р. В., КАЛАЙДО О. В.**

# **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ**

*Методичні рекомендації до організації  
самостійної роботи студентів 3 курсу  
спеціальностей «Трудове навчання» і «Професійна освіта»  
усіх форм навчання*

2-ге видання, доповнене

**Луганськ  
ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка»  
2010**

УДК 539.4.01(076.5)

ББК 30.121р3

К64

**Рецензенти:**

**Кривонос С. Д.** - кандидат технічних наук, декан природничого факультету Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля.

**Бсляєв Б. В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Луганського національного університету імені Тараса Шевченка.

**Козуб Ю. Г.**

К64 Теоретичні основи теплотехніки : метод. рек. до організації сам. роботи студ. спец. «Трудове навчання» і «Професійна освіта» усіх форм навч. / Ю. Г. Козуб, Р. В. Киричевський, О. В. Калайдо ; Держ. закл. «Луган. нац. ун-т імені Тараса Шевченка». – 2-ге вид., доповн. – Луганськ : Вид-во ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2010. – 64 с.

Методичні вказівки призначені для студентів 3 курсу денної та заочної форм навчання, що навчаються за спеціальностями «Трудове навчання», «Професійне навчання» і «Механізація сільськогосподарського виробництва». Вони містять 8 задач з найбільш важливих тем дисципліни. Кожна задача має 100 варіантів даних. До кожної задачі наведено детальний зразок вирішення. У додатку наведені всі необхідні довідкові дані.

Рекомендовано для студентів 3 курсу спеціальностей «Трудове навчання», «Професійне навчання», «Механізація сільськогосподарського виробництва» всіх форм навчання.

УДК 539.4.01(076.5)

ББК 30.121р3

*Рекомендовано до друку навчально-методичною радою  
Луганського національного університету імені Тараса Шевченка  
(протокол № 3 від 4 листопада 2009 року)*

© Козуб Ю. Г, Киричевський Р. В., Калайдо О. В., 2010

© ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2010

## ЗМІСТ

Передмова.....	4
Питання курсу.....	5
<b><u>1 модуль</u></b>	
Закони ідеальних газів	
Завдання 1.....	8
Цикли теплових двигунів	
Завдання 2.....	17
Теплообмін при обтіканні пучка труб	
Завдання 3.....	29
Теплопередача через плоску стінку	
Завдання 4.....	33
<b><u>2 модуль</u></b>	
Термічний опір багат шарової стінки	
Завдання 5.....	37
Розрахунок теплообмінних апаратів	
Завдання 6.....	41
Розрахунок теплообмінних апаратів при охолодженні	
Завдання 7.....	47
Параметри вологого повітря	
Завдання 8.....	53
Додатки.....	58
Література.....	63

## Передмова

Основною проблемою на сучасному етапі розвитку техніки є надійне забезпечення галузей промисловості, сільського господарства і соціально-побутового сектора енергоносіями. Постійне збільшення потреби в паливі та інших видах енергії, що супроводжується постійним підвищенням її вартості, висуває на перший план питання ефективного використання палива, захисту навколишнього середовища від забруднення продуктами згорання. Важливу роль в вирішенні цієї задачі грає підвищення якості теплотехнічної підготовки інженерних кадрів.

Мета курсу «Теоретичні основи теплотехніки» - теоретично і практично підготувати майбутніх фахівців в області отримання, перетворення, передачі та використання теплоти в такому ступені, щоб вони могли вибрати і при необхідності експлуатувати теплотехнічне устаткування, забезпечуючи при цьому максимальну економію паливно-енергетичних ресурсів і матеріалів, знаходження і використання вторинних енергоресурсів і так далі.

Завданням курсу є формування у студентів:

- знань теплотехнічної термінології, законів отримання і перетворення енергії, методів аналізу ефективності використання теплоти;
- знань щодо принципів дії, конструкцій, областей застосування і потенційних можливостей основного теплоенергетичного устаткування (теплообмінників, кондиціонерів, парових котлів, печей та ін.);
- умінь експериментально визначати характеристики теплоенергетичного устаткування; проводити вимірювання основних теплотехнічних показників, пов'язаних з профілем інженерної діяльності.

Курс «**Теоретичні основи теплотехніки**» складається з трьох розділів: теоретичних «Основи технічної термодинаміки» та «Основи теорії теплообміну», і прикладної частини курсу - «Цикли теплових машин».

При вивченні теплотехніки студенти, керуючись програмою курсу, самостійно працюють над вирішенням наданих в посібнику задач, виконуючі контрольні роботи, прослуховують лекції з основних питань курсу.

Матеріал курсу вивчають за основними підручниками (див. список літератури, що рекомендується). Для докладнішого і глибшого вивчення окремих питань і в допомогу при виконанні контрольних робіт рекомендується додаткова література. При самостійній роботі над підручниками необхідно добиватися уявлення про фізичну суть явищ та процесів, що вивчаються. Нижче приведені питання з усього курсу.

## Питання курсу

1. Історія розвитку теплотехніки.
2. Предмет технічної термодинаміки та її завдання.
3. Значення і завдання теплоенергетики.
4. Основні параметри термодинамічного стану газу: температура, тиск, питомий об'єм.
5. Закон ідеальних газів.
6. Рівняння стану ідеального газу.
7. Зміст першого початку термодинаміки і його аналітичний вираз.
8. Робота термодинамічного процесу.
9. Внутрішня енергія і її властивості.
10. Ентальпія газу.
11. Дослідження ізохорного процесу.
12. Рівняння першого початку термодинаміки для потоку газу.
13. Дослідження ізобарного процесу.
14. Дослідження адіабатного процесу.
15. Поняття про політропний процес.
16. Кругові процеси або цикли.
17. Визначення другого початку термодинаміки.
18. Прямий цикл Карно.
19. Зворотний цикл Карно.
20. Ентропія газу.
21. Зображення основних термодинамічних процесів.
22. Вимоги, що пред'являються до палив карбюраторного ДВЗ.
23. Вимоги, що пред'являються до палив дизельного ДВЗ.
24. Токсичність і димність продуктів згорання палива.
25. Способи зниження димності і токсичності продуктів згорання палива.
26. Перспективи розвитку ДВЗ.
27. Характеристика і області застосування ДВЗ.
28. Узагальнений цикл.
29. Ідеальний цикл ДВЗ із змішаним підведенням теплоти (цикл Трінклера).
30. Ідеальний цикл ДВЗ із підведенням тепла при постійному тиску (цикл Дизеля).
31. Ідеальний цикл ДВЗ з підведенням тепла при постійному об'ємі (цикл Отто).
32. Індикаторні діаграми ДВЗ.
33. Індикаторна і ефективна потужність.
34. Принцип роботи ДВЗ.
35. Основні механізми, вузли і системи ДВЗ.

36. Надув і його роль в розвитку ДВЗ.
37. Перспективи розвитку газотурбінних двигунів.
38. Області застосування газотурбінних двигунів.
39. Принципова система газотурбінного двигуна.
40. Ідеальний цикл газотурбінної установки.
41. Принципова схема парогазових установок.
42. Перспективи розвитку парогазових установок.
43. Водяна пара як одне з робочих тіл в теплотехніці.
44. Зображення процесу утворення пари в діаграмі «PV».
45. Термодинамічні параметри води.
46. Термодинамічні параметри сухої насиченої пари.
47. Термодинамічні параметри насиченої водяної пари.
48. Зображення процесу паротворення в «TV» діаграмі.
49. «IS» діаграма водяної пари.
50. Способи розповсюдження тепла і види теплообміну .
51. Теплопровідність для однорідної плоскої стінки.
52. Теплопровідність для багатшарової плоскої стінки.
53. Теплопровідність для одношарової циліндрової стінки.
54. Поняття про конвективний теплообмін.
55. Коефіцієнт теплопередачі.
56. Коефіцієнт тепловіддачі.
57. Коефіцієнт теплопровідності.
58. Теплопередача через плоску стінку за наявності шкідливого шару.
59. Теплопередача через циліндрову стінку за наявності шкідливого шару.
60. Термічний опір теплопередачі.
61. Теплова ізоляція.
62. Класифікація теплообмінних апаратів.
63. Основні положення розрахунку теплообмінних апаратів.
64. Прямоточні і протиточні схеми теплоносіїв.
65. Процес горіння палива. Коефіцієнт надлишку палива.
66. Котельна установка, її загальна характеристика і основні елементи.
67. Конструктивні схеми топки для спалювання найбільш поширених палив.
68. Котельний агрегат (парогенератор), його складові частини.
69. Тепловий баланс і коефіцієнт корисної дії котельних установок.
70. Системи водопідготовки в котельних установках.
71. Подача повітря і видалення продуктів згоряння палива в котельній установці.
72. Золоуловлювання і золовидалення в котельних установках.
73. Принципова схема котельного агрегату.

74. Суть проміжного перегріву пари в паротурбінній установці.
75. Регенеративний цикл паротурбінної установки.
76. Парові турбіни, їх класифікація, принцип роботи.
77. Устрій парової турбіни.
78. Втрати в парових турбінах і їх ККД.
79. Компонувальна схема сучасної паротурбінної установки.
80. Теплові електричні станції, їх схеми.
81. Основне устаткування ТЕС.
82. Вироблення теплової енергії на ТЕС.
83. Шляхи підвищення коефіцієнта використання палива на сучасних теплоелектростанціях.
84. Електричні показники теплоелектроцентралей, їх роль в єдиній енергосистемі країни.
85. Поняття про теорію подібності, критерії подібності, теореми подібності для подібних процесів, критерійне рівняння подібності.
86. Що таке сучасна АЕС?
87. Розвиток ядерної енергетики і її роль в науково-технічній революції.
88. Роль України в світовому використанні енергії атома, перспективи ядерної енергетики.
89. Магнітогідродинамічні електрогенератори.
90. Термоелектричні установки.
91. Термоіонні генератори.
92. Ядерне паливо, матеріали, які розщеплюються, їх характеристики.
93. Типи атомних реакторів, устрій водографітних, водоводних і натрієвих реакторів.
94. Основні схеми атомних електростанцій: одно-, двох-, трьохконтурні. Біологічний захист.
95. Перспективні джерела енергії.
96. Нетрадиційні джерела енергії, варіанти їх використання.
97. Паливні ресурси України, їх характеристика.
98. Комбіноване вироблення електричної і теплової енергії, як основний зміст технології, що реалізується в Україні.
99. Установки для зменшення токсичності, вживані у важкій промисловості.
100. Принцип дії сонячних батарей.

## МОДУЛЬ 1

### 1. Закони ідеальних газів

#### Теоретичні відомості

*Теплотехніка* – це дисципліна, що вивчає процеси взаємного перетворення теплоти і роботи в різноманітних машинах.

*Параметри стану* – фізичні величини, що повністю описують стан робочого тіла. До них відносяться температура, тиск, питомий об'єм.

**Тиск** – фізична величина, що дорівнює силі, яка діє на одиницю площі по нормалі до даної поверхні. Одиниця виміру тиску – Паскаль:  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ . На практиці здебільшого застосовують кратні одиниці:  $1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па}$ ,  $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$ . Також в технічній термодинаміці використовується позасистемна одиниця – бар:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа}.$$

В залежності від величини тиск, що вимірюється, може бути одним з трьох видів:

- а) *барометричний* – тиск атмосферного повітря, що вимірюється барометром;
- б) *надлишковий* – тиск газу вищий за барометричний, вимірюється манометром;
- в) *вакуумний* – тиск газу, нижчий за барометричний, вимірюється вакуумметром.

Параметром стану є абсолютний тиск, який можна виражати одним з двох способів:

$$d_{\text{раб}} = d_{\text{атм}} + d_{\text{цза}}, \quad d_{\text{вак}} = d_{\text{атм}} - d_{\text{вак}}.$$

Величину тиску можна також виражати в одиницях висоти стовпа рідини

$$d = \rho gh.$$

Найбільше поширення отримали ртутний та водяний стовпи рідини. Наприклад  $0,1 \text{ МПа} = 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм. рт. ст.}$

**Питомий об'єм** – параметр стану, що дорівнює об'єму  $1 \text{ кг}$  газу

$$v = \frac{V}{\dot{n}}.$$

Оберненою величиною є *густина* – маса газу, що знаходиться в одиниці об'єму

$$\rho = \frac{\dot{m}}{V}.$$

Для обернених величин завжди виконується правило

$$\rho v = 1.$$



**Температура** – фізична величина, що характеризує ступінь нагрітості тіла. Існує декілька температурних шкал, однак практичне використання в рамках даної дисципліни отримали дві наступні шкали:

а) *абсолютна шкала* (Кельвіна) – шкала, в якій за початок відліку прийнято мінімальну температуру Всесвіту, за якої припиняється тепловий рух атомів і молекул (абсолютний нуль  $0 \text{ K} = -273^\circ\text{C}$ ).

б) *практична шкала* (Цельсію) – шкала, в якій за початок відліку прийнято температуру фазового переходу води з рідкого стану до твердого чи навпаки за нормальних умов.

Один градус шкали Кельвіна дорівнює одному градусу шкали Цельсію, а формула переходу з однієї шкали до іншої

$$t^\circ\text{C} = T - 273.$$

*Ідеальний газ* – газ, у якого відсутні сили взаємодії між молекулами, а їх власний об'єм дорівнює нулю.

**Закон Авогадро:** однакові об'єми різних газів містять однакову кількість молекул, якщо ці гази мають однакові об'єм і температуру

$$\mu_1 v_1 = \mu_2 v_2 = \dots = \text{const} = 22,4 \left( \frac{\text{л}}{\text{моль}} \right).$$

Залежність між параметрами стану описує **рівняння стану ідеального газу:**

$$pV = \nu RT, \quad \text{де } R = \frac{8314 \text{ Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

$R$  – універсальна газова стала, яка дорівнює роботі, що виконує 1 кг ідеального газу при збільшенні його температури на 1 К (або  $1^\circ\text{C}$ ).

**Закон Дальтона:** тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків кожного із газів

$$p = \sum_{i=1}^n p_i = p_1 + p_2 + \dots + p_n.$$

*Масова доля компонента* – відношення маси даного компонента до маси усієї суміші

$$g_1 = \frac{m_1}{m}, g_2 = \frac{m_2}{m}, \dots, g_n = \frac{m_n}{m}.$$

Сума масових долей дорівнює одиниці

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1.$$

Об'ємна доля – відношення парціального об'єму компонента до об'єму усієї суміші

$$r_1 = \frac{V_1}{V}, r_2 = \frac{V_2}{V}, \dots, r_n = \frac{V_n}{V}.$$

Сума масових долей дорівнює одиниці

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1.$$

Густина суміші, що містить  $n$  компонентів, визначається за формулою:

- при об'ємному складі суміші

$$\rho_{\text{н\acute{e}}} = \sum r_i \cdot \rho_i = r_1 \cdot \rho_1 + r_2 \cdot \rho_2 + \dots + r_d \cdot \rho_d;$$

- при масовому складі суміші

$$\rho_{\text{н\acute{e}}} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\rho_i}} = \frac{1}{\sum \frac{g_1}{\rho_1}} + \frac{1}{\sum \frac{g_2}{\rho_2}} + \dots + \frac{1}{\sum \frac{g_d}{\rho_d}}.$$

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1.$$

Молекулярна маса суміші, що містить  $n$  компонентів, визначається за формулою:

- при об'ємному складі суміші

$$\mu_{\text{н\acute{e}}} = \sum r_i \cdot \mu_i = r_1 \cdot \mu_1 + r_2 \cdot \mu_2 + \dots + r_d \cdot \mu_d;$$

- при масовому складі суміші

$$\mu_{\text{н\acute{e}}} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\sum \frac{g_1}{\mu_1}} + \frac{1}{\sum \frac{g_2}{\mu_2}} + \dots + \frac{1}{\sum \frac{g_d}{\mu_d}}.$$

Газова стала суміші

- при об'ємному складі суміші

$$R_{\text{н\acute{e}}} = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{r_1 \cdot \mu_1 + r_2 \cdot \mu_2 + \dots + r_d \cdot \mu_d};$$

- при масовому складі суміші

$$R_{\text{н\acute{e}}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_1 R_1 + g_2 R_2 + \dots + g_n R_n.$$

Парціальний тиск окремого компонента при об'ємному та масовому складі суміші

$$\bar{d}_i = r_i p, \quad p_i = g_i \frac{\mu}{\mu_i} p.$$

**Теплоємність**  $c$  – кількість теплоти, яку необхідно передати одиниці кількості газу для зміни його температури на 1 К (1°C) в даному процесі. В загальному випадку

$$\dot{n} = \frac{dq}{dt} = \frac{dU + pdv}{dt} = \frac{dU}{dt} + p \frac{dv}{dt}.$$

Розрізняють наступні види теплоємності:

- а) *масова*  $C$  – теплоємність 1 кг газу, одиниця виміру – Дж/(кг·К);
- б) *об'ємна*  $C'$  – теплоємність 1 м<sup>3</sup> газу, взятого за нормальних умов, одиниця виміру – Дж/(м<sup>3</sup>·К);
- в) *мольна*  $\mu C$  – теплоємність 1 кіломолю газу, одиниця виміру – Дж/(кмоль·К).

Співвідношення між теплоємностями

$$\dot{N}' = \dot{N}'_{\rho_i} = \frac{\mu \dot{N}}{22,4}, \quad \dot{N} = \dot{N}'_{\nu_i} = \frac{\mu \dot{N}}{\mu}.$$

Теплоємність залежить від процесу, за якого відбувається нагрів газу. Розрізняють ізобарну та ізохорну теплоємності.

*Ізохорна* – теплоємність газу за ізохорного процесу. Буває масова  $C_v$ , об'ємна  $C'_v$  і мольна  $\mu C_v$

$$\dot{N}'_v = \frac{dq_v}{dt} = \frac{dU}{dt} \Rightarrow dU = C_v dt.$$

*Ізобарна* – теплоємність газу за ізобарного процесу. Буває масова  $C_p$ , об'ємна  $C'_p$  і мольна  $\mu C_p$

$$\dot{N}'_d = \frac{dq_d}{dt} = \frac{dU}{dt} + d \frac{dv}{dt} = C_v + p \frac{dv}{dt}.$$

**Рівняння Майєра:** теплоємність газу за ізобарного процесу більша теплоємності за постійного об'єму на величину універсальної газової сталої

$$\dot{N}'_d = \dot{N}'_v + R.$$

Рівняння Майєра справедливе і для інших теплоємностей

$$\mu \dot{N}'_d = \mu \dot{N}'_v + \mu R = \mu \dot{N}'_v + 8314;$$

$$C'_p = \dot{N}'_v + \frac{8314}{22,4} = \dot{N}'_v + 371,2.$$

Теплоємність суміші газів при масовому та об'ємному складі системи

$$\dot{n} = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots + g_n c_n; \quad \dot{n}' = r_1 c'_1 + r_2 c'_2 + \dots + r_n c'_n.$$

### Завдання 1

**Дано:** Суміш газів має наступний масовий (об'ємний) процентний склад при тиску  $p_{\text{сум}}$ , МПа і температурі  $t$ , °С та займає об'єм  $V_{\text{сум}}$ , м<sup>3</sup>.

Визначити:

1. Середню молекулярну масу суміші, через об'ємні і масові доли;
2. Об'ємний (масовий) склад суміші;

3. Газові постійні компонентів і суміші;
4. Парціальний тиск компонентів через об'ємні і масові долі;
5. Маса суміші і всіх її компонентів;
6. Густина і питоми об'єми компонентів і суміші за заданих умов;
7. Густина і питоми об'єми компонентів і суміші за нормальних фізичних умов;
8. Питому молярну, об'ємну і масову теплоємності суміші, які не залежать від температури, при  $p = const$  і  $V = const$ ;

Вихідні дані взяти з табл. 1 за номером шифру.

Таблиця №1

Перед-остання цифра шифру	Зміст компонентів, %						Склад суміші	Остан. цифра шифру	P, МПа	t, °C	V, м <sup>3</sup>	t <sub>1</sub> , °C	t <sub>2</sub> , °C
	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO							
0	-	50	29	10	11	-	Об'ємний	0	0,095	450	2	200	1000
1	-	80	8	10	-	2		1	0,090	150	3	500	800
2	30	55	-	5	-	10		2	0,105	500	4	250	750
3	5	75	-	-	5	15		3	0,125	200	5	500	1000
4	-	-	55	20	15	10		4	0,115	300	6	300	1200
5	20	50	20	-	-	10	Масовий	5	0,096	700	7	150	650
6	45	15	25	-	15	-		6	0,100	300	8	100	600
7	10	60	-	10	-	20		7	0,110	100	2	400	900
8	3	-	-	5	62	30		8	0,090	350	4	400	820
9	8	-	62	-	15	15		9	0,125	250	6	300	1300

### Приклад розв'язання завдання 1 (об'ємне задання суміші)

**Дано:** Суміш газів має наступний об'ємний процентний склад: N<sub>2</sub> – 40%, H<sub>2</sub> – 30%, CO<sub>2</sub> – 30%. Тиск суміші  $p_{сум} = 0,095$  МПа, її температура  $t = 450^\circ\text{C}$ , об'єм  $V_{сум} = 2$  м<sup>3</sup>. Визначити усі величини з пунктів 1-8 завдання.

#### Рішення

По таблиці Менделєєва знаходимо молярні маси компонентів суміші: для азоту  $\mu_{N_2} = 28$  кг/кмоль, для водню  $\mu_{H_2} = 2$  кг/кмоль, для вуглецевого газу  $\mu_{CO_2} = 44$  кг/кмоль.

1. Визначаємо середню молекулярну масу суміші при об'ємному заданні:

$$\mu_{сум} = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot \mu_i = 0,4 \cdot 28 + 0,3 \cdot 2 + 0,3 \cdot 44 = 25 \left( \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right).$$

2. Визначаємо масовий склад суміші:

$$g_{N_2} = \frac{r_{N_2} \cdot \mu_{N_2}}{\mu_{\text{сум}}} = \frac{0,4 \cdot 28}{25} = 0,448; \quad g_{H_2} = \frac{r_{H_2} \cdot \mu_{H_2}}{\mu_{\text{сум}}} = \frac{0,3 \cdot 2}{25} = 0,024;$$

$$g_{CO_2} = \frac{r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2}}{\mu_{\text{сум}}} = \frac{0,3 \cdot 44}{25} = 0,528.$$

3. Визначаємо газові сталі компонентів і суміші. Для компонентів

$$R_{N_2} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{N_2}} = \frac{8314}{28} = 296,9 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right); \quad R_{H_2} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{H_2}} = \frac{8314}{2} = 4157 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right);$$

$$R_{CO_2} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{CO_2}} = \frac{8314}{44} = 188,9 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

суміші маємо

Для всієї суміші маємо

$$R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^3 g_i R_i = 0,448 \cdot 296,9 + 0,024 \cdot 4157 + 0,528 \cdot 188,9 = 332,6 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

4. Визначаємо парціальний тиск компонентів суміші:

$$p_{N_2} = r_{N_2} \cdot p_{\text{сум}} = 0,4 \cdot 0,095 = 0,038 \text{ (МПа)},$$

$$p_{H_2} = r_{H_2} \cdot p_{\text{сум}} = 0,3 \cdot 0,095 = 0,029 \text{ (МПа)},$$

$$p_{CO_2} = r_{CO_2} \cdot p_{\text{сум}} = 0,3 \cdot 0,095 = 0,029 \text{ (МПа)}.$$

5. Визначення масу суміші і всіх її компонентів. Для цього переведемо температуру суміші в Кельвіни

$$T_{\text{сум}} = t + 273 = 450 + 273 = 723 \text{ К}.$$

Визначаємо масу суміші:

$$m_{\text{см}} = \frac{p_{\text{сум}} \cdot V_{\text{сум}}}{R_{\text{сум}} \cdot T_{\text{сум}}} = \frac{95000 \cdot 2}{332,6 \cdot 723} = 0,79 \text{ (кг)}.$$

Маса окремих компонентів суміші:

$$m_{N_2} = g_{N_2} \cdot m_{\text{сум}} = 0,448 \cdot 0,79 = 0,35 \text{ (кг)},$$

$$m_{H_2} = g_{H_2} \cdot m_{\text{сум}} = 0,024 \cdot 0,79 = 0,02 \text{ (кг)},$$

$$m_{CO_2} = g_{CO_2} \cdot m_{\text{сум}} = 0,528 \cdot 0,79 = 0,42 \text{ (кг)}.$$

6. Визначаємо густину та питомі об'єми компонентів і всієї суміші за заданих умов. Для густини всієї суміші маємо

$$\rho_{\text{сум}} = \frac{p_{\text{сум}}}{R_{\text{сум}} \cdot T_{\text{сум}}} = \frac{95000}{332,6 \cdot 723} = 0,40 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Визначаємо густину окремих компонентів суміші

$$\rho_{N_2} = \frac{p_{\text{сум}}}{R_{N_2} \cdot T_{\text{сум}}} = \frac{95000}{296,9 \cdot 723} = 0,44 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right);$$

$$\rho_{H_2} = \frac{p_{\text{сум}}}{R_{H_2} \cdot T_{\text{сум}}} = \frac{95000}{4157 \cdot 723} = 0,03 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right);$$

$$\rho_{CO_2} = \frac{p_{\text{сум}}}{R_{CO_2} \cdot T_{\text{сум}}} = \frac{95000}{188,9 \cdot 723} = 0,70 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Питомий об'єм всієї суміші

$$v_{\text{сум}} = \frac{1}{\rho_{\text{сум}}} = \frac{1}{0,40} = 2,5 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Визначаємо питомий об'єм окремих компонентів суміші

$$v_{N_2} = \frac{1}{\rho_{N_2}} = \frac{1}{0,44} = 2,26 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right); \quad v_{H_2} = \frac{1}{\rho_{H_2}} = \frac{1}{0,03} = 31,64 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right);$$

$$v_{CO_2} = \frac{1}{\rho_{CO_2}} = \frac{1}{0,70} = 1,44 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

7. Визначаємо густину і питомі об'єми компонентів і всієї суміші за нормальних фізичних умов. Для густини суміші маємо

$$\rho_{\text{н.сум}} = \frac{\mu_{\text{сум}}}{V_{\mu.н}} = \frac{25}{22,4} = 1,12 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Густина компонентів суміші за нормальних фізичних умов

$$\rho_{N_2н} = \frac{\mu_{N_2}}{V_{\mu.н}} = \frac{28}{22,4} = 1,25 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right); \quad \rho_{H_2н} = \frac{\mu_{H_2}}{V_{\mu.н}} = \frac{2}{22,4} = 0,09 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right);$$

$$\rho_{CO_2н} = \frac{\mu_{CO_2}}{V_{\mu.н}} = \frac{44}{22,4} = 1,96 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right).$$

Питомий об'єм всієї суміші за нормальних умов

$$v_{\text{н.сум}} = \frac{1}{\rho_{\text{н.сум}}} = \frac{1}{1,12} = 0,90 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Питомий об'єм окремих компонентів суміші за нормальних умов

$$v_{N_2н} = \frac{1}{\rho_{N_2н}} = \frac{1}{1,25} = 0,80 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right); \quad v_{H_2н} = \frac{1}{\rho_{H_2н}} = \frac{1}{0,09} = 11,2 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right);$$

$$v_{CO_2H} = \frac{1}{\rho_{CO_2H}} = \frac{1}{1,96} = 0,51 \left( \frac{M^3}{кг} \right).$$

8. Визначаємо питомі теплоємності компонентів і всієї суміші, які не залежать від температури. Значення молярних теплоємностей  $\mu C_p$  і  $\mu C_v$  беремо з табл. 2 Додатку, враховуючи, що  $N_2$  і  $H_2$  – двоатомні гази, а  $CO_2$  – трьохатомний. Тоді питома молярна теплоємність суміші за постійного тиску і постійного об'єму

$$\mu C_{p, сум} = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot \mu C_{p,i} = 0,4 \cdot 29,1 + 0,3 \cdot 29,1 + 0,3 \cdot 37,4 = 31,6 \left( \frac{кДж}{кмоль \cdot K} \right);$$

$$\mu C_{v, сум} = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot \mu C_{v,i} = 0,4 \cdot 20,8 + 0,3 \cdot 20,8 + 0,3 \cdot 29,1 = 23,3 \left( \frac{кДж}{кмоль \cdot K} \right).$$

Питома об'ємна теплоємність суміші за постійного тиску і постійного об'єму

$$C'_{p, сум} = \frac{\mu C_{p, сум}}{V_{\mu, сум}} = \frac{31,6}{22,4} = 1,41 \left( \frac{кДж}{M^3 \cdot K} \right);$$

$$C'_{v, сум} = \frac{\mu C_{v, сум}}{V_{\mu, сум}} = \frac{23,3}{22,4} = 1,04 \left( \frac{кДж}{M^3 \cdot K} \right).$$

Питома масова теплоємність суміші за постійного тиску і постійного об'єму:

$$C_{p, сум} = \frac{\mu C_{p, сум}}{\mu_{сум}} = \frac{31,6}{25} = 1,26 \left( \frac{кДж}{кг \cdot K} \right);$$

$$C_{v, сум} = \frac{\mu C_{v, сум}}{\mu_{сум}} = \frac{23,3}{25} = 0,93 \left( \frac{кДж}{кг \cdot K} \right).$$

### Приклад розв'язання завдання 1 (масове задання суміші)

**Дано:** Суміш газів має наступний масовий процентний склад:  $H_2$  – 15%,  $H_2O$  – 62%,  $CO_2$  – 23%. Тиск суміші  $p_{сум} = 0,125$  МПа, її температура  $t = 250^\circ C$ , об'єм  $V_{сум} = 6$  м<sup>3</sup>. Визначити усі величини з пунктів 1-8 завдання.

#### Рішення

По таблиці Менделєєва знаходимо молярні маси компонентів суміші: для азоту  $\mu_{N_2} = 28$  кг/кмоль, для водню  $\mu_{H_2} = 2$  кг/кмоль, для вуглецевого газу  $\mu_{CO_2} = 44$  кг/кмоль.

1. Визначаємо середню молекулярну масу суміші при масовому заданні:

$$\mu_{\text{сум}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 \frac{g_i}{\mu_i}} = \frac{1}{\frac{0,15}{2} + \frac{0,62}{18} + \frac{0,23}{44}} = 8,75 \left( \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right).$$

2. Визначаємо масовий склад суміші:

$$r_{\text{H}_2} = \frac{g_{\text{H}_2} \cdot \mu_{\text{сум}}}{\mu_{\text{H}_2}} = \frac{0,15 \cdot 8,75}{2} = 0,655; \quad r_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{g_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \mu_{\text{сум}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,62 \cdot 8,75}{18} = 0,300;$$

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{g_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{сум}}}{\mu_{\text{CO}_2}} = \frac{0,23 \cdot 8,75}{44} = 0,045.$$

3. Визначаємо газові сталі компонентів і суміші. Для компонентів суміші маємо

$$R_{\text{H}_2} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{H}_2}} = \frac{8314}{2} = 4157 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right); \quad R_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{8314}{18} = 461,9 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right);$$

$$R_{\text{CO}_2} = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{CO}_2}} = \frac{8314}{44} = 188,9 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

Для всієї суміші маємо

$$R_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^3 g_i R_i = 0,15 \cdot 4157 + 0,62 \cdot 461,9 + 0,23 \cdot 188,9 = 953,4 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

4. Визначаємо парціальний тиск компонентів суміші:

$$p_{\text{H}_2} = \frac{g_{\text{H}_2} \cdot \mu_{\text{сум}} \cdot p_{\text{сум}}}{\mu_{\text{H}_2}} = \frac{0,15 \cdot 8,75 \cdot 0,125}{2} = 0,082 \text{ (МПа)},$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{g_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \mu_{\text{сум}} \cdot p_{\text{сум}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,62 \cdot 8,75 \cdot 0,125}{18} = 0,339 \text{ (МПа)},$$

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{g_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{сум}} \cdot p_{\text{сум}}}{\mu_{\text{CO}_2}} = \frac{0,23 \cdot 8,75 \cdot 0,125}{44} = 0,126 \text{ (МПа)}.$$

Виконання пунктів 5-8 є аналогічним як для масового, так і для об'ємного задання складу суміші, воно наведено в попередньому прикладі.



## 2. Цикли теплових двигунів

### Теоретичні відомості

Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) – теплова машина, що використовує в якості робочих тіл продукти згоряння рідких чи газоподібних палив, які спалюються всередині циліндру.

При вивченні роботи ДВЗ приймають наступні припущення:

1. Всмоктування та вихлоп, не вважаються термодинамічними процесами і не беруться до уваги, оскільки протікають за змінної кількості робочої речовини.
2. Хімічні властивості робочої речовини та її кількість на всіх стадіях не змінюються.
3. Процеси горіння розглядаються як підведення еквівалентної кількості теплоти до робочого тіла.
4. Видалення продуктів горіння еквівалентне відведенню теплоти від робочого тіла.
5. Усі процеси є рівноважними та зворотними, тобто втрати на тертя і теплопровідність до уваги не беруться.

### Цикл з підведенням теплоти за постійного об'єму $V = \text{const}$ (цикл Отто)

За даного циклу працюють карбюраторні ДВЗ на легкому паливі з низькою температурою займання. Запалення суміші відбувається від електричної іскри.

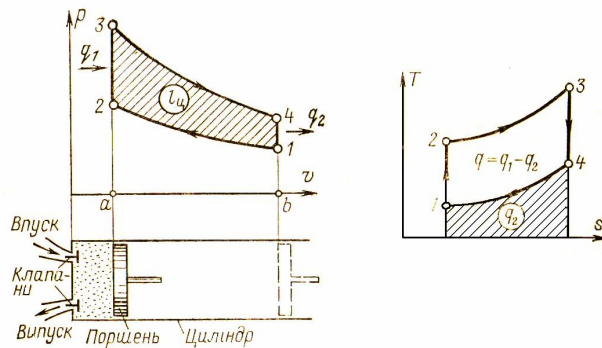


Рис. 1. p-v і T-S діаграми циклу ДВЗ з підведенням теплоти за постійного об'єму.

Вивчення циклів відбувається за допомогою діаграм (мал.. 1). Маємо: 1-2: адіабатний стиск при русі поршня справа наліво.

Ступінь стиску – відношення початкового об'єму до кінцевого

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}.$$

Робота стиску завжди від'ємна.

2-3: ізохорне підведення тепла, еквівалентного теплоті згоряння палива

$$q_1 = C_v(T_3 - T_2).$$

Характеризується ступенем підвищення тиску

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}.$$

3-4: адіабатне розширення до початкового об'єму при робочому русі поршня. Робота розширення газу завжди додатна.

4-1: ізохорне відведення від газу тепла

$$q_2 = C_v(T_4 - T_1),$$

що відповідає видаленню відпрацьованих газів до атмосфери.

Корисно використана в циклі теплота дорівнює різниці між теплою двох ізохорних процесів (площа 1234 в T-S діаграмі).

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

підвищується при збільшенні ступеню стиску  $\varepsilon$ .

Ступінь стиску в таких двигунах змінюється в межах  $\varepsilon = 4 \div 8$ .

Більш високий ступінь стиску неприпустимий, оскільки температура суміші може перевищити температуру займання. При цьому суміш загориться ще до того, як поршень прийде в крайнє положення, що призведе до аварії.

Фізичні властивості газу мають незначний вплив на ККД, оскільки коефіцієнт

$$k = \frac{C_p}{C_v}$$

змінюється в вузьких межах.

### **Цикл з підведенням теплоти за постійного тиску $P = \text{const}$ (цикл Дизеля)**

За даного циклу працюють дизельні ДВЗ в яких стискається атмосферне повітря. В них застосовуються високі ступені стиску  $\varepsilon = 14 \div 18$ , що дозволяє наприкінці стискання отримати температуру  $750 - 900^\circ\text{C}$ . В цей момент до стисненого повітря додається дрібно розпилене рідке паливо. Запалення і горіння суміші відбувається за постійного

тиску (поступове згоряння). Сталість тиску регулюється паливною форсункою.

Цикл з підведенням теплоти за постійного тиску (Дизеля) зображено на рис. 2.

1-2: адіабатний стиск атмосферного повітря зі ступенем стиску

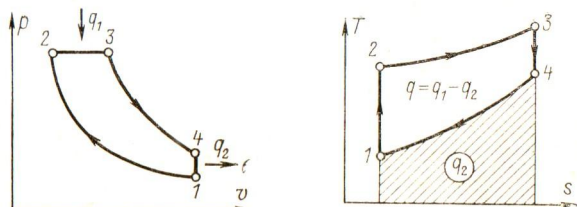


Рис. 2. p-v і T-S діаграми циклу ДВЗ з підведенням теплоти за постійного тиску.

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}.$$

2-3: ізобарне підведення тепла, еквівалентного теплоті згоряння палива

$$q_1 = C_p(T_3 - T_2).$$

3-4: адіабатне розширення робочого тіла до початкового.

4-1: ізохорне відведення від газу тепла

$$q_2 = C_v(T_4 - T_1),$$

що відповідає охолодженню відпрацьованих газів в атмосфері.

Важливою характеристикою циклу Дизеля є ступінь попереднього розширення

$$\rho = \frac{v_3}{v_2}.$$

Корисно використана в циклі теплота дорівнює різниці між теплою двох ізохорних процесів (площа 1234 в T-S діаграмі).

Термічний ККД циклу

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{k} \cdot \frac{\rho^k - 1}{\rho - 1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

тим більше, чим більше ступінь стиску  $\varepsilon$  і чим нижче ступінь попереднього розширення  $\rho$ .

### Завдання 2

Дано: робоче тіло масою  $m$ , кг (об'ємом  $V, \text{м}^3$ ) з початковою температурою  $t_1, ^\circ\text{C}$  і тиском  $p_1$ , бар здійснює цикл двигуна

внутрішнього згоряння з ізохорним  $v = \text{const}$  (ізобарним  $p = \text{const}$ ) підведенням тепла, що має наступні характеристики ( $\lambda, \rho, \varepsilon$ ).

**Визначити:**

1. Основні ( $p, V, T$ ) і калоричні ( $u, i, s$ ) параметри робочого тіла у вузлових точках циклу;
2. Зміну калоричних параметрів, роботу і теплоту для кожного процесу, що входить в цикл;
3. Питому роботу циклу, термічний ККД і ефективність заданого циклу порівняно з циклом Карно, здійсненому в заданому температурному інтервалі.

Побудувати на в масштабі цикл в  $p-v$  і  $T-S$  координатах. Для побудови адиабат в  $p-v$  координатах і ізохор (ізобар) в  $T-S$  координатах використовувати дані чотирьох точок.

Вважати робоче тіло ідеальним газом, а теплоємність прийняти такою, що не залежить від температури. Данні до розрахунку взяти з табл. 2 згідно номера шифру.

Таблиця №2

Передостання цифра шифру	m, кг	V <sub>1</sub> , м <sup>3</sup>	t <sub>1</sub> , °C	P <sub>1</sub> , бар	Остання цифра шифру	Робоче тіло	Спосіб підведення тепла	Характеристика циклу		
								ε	ρ	λ
0	0,7	-	0	1,1	0	Повітря	За постійного об'єму V = const	5,0	-	4,6
1	-	1,3	10	0,9	1	O <sub>2</sub>		5,5	-	4,4
2	1,1	-	30	1,2	2	N <sub>2</sub>		6,0	-	3,9
3	-	0,9	20	0,8	3	CO <sub>2</sub>		6,5	-	3,4
4	0,9	-	40	0,9	4	CO		7,0	-	3,2
5	-	1,1	-10	0,7	5	SO <sub>2</sub>	За постійного тиску P = const	14	2,2	-
6	0,8	-	50	1,0	6	He		15	2,0	-
7	-	1,2	-20	0,8	7	Ar		16	1,8	-
8	0,6	-	-5	1,1	8	H <sub>2</sub> O		13	1,9	-
9	-	1,4	-15	1,2	9	H <sub>2</sub>		12	1,7	-

**Приклад розв'язання завдання 2**

**(підведення тепла за  $p = \text{const}$ )**

**Дано:** Аміак (NH<sub>3</sub>) початковим об'ємом  $V_1 = 1,1 \text{ м}^3$ , температурою  $t_1 = 7^\circ\text{C}$  і тиском  $p_1 = 1,2$  бар, здійснює цикл двигуна внутрішнього згоряння з ізобарним підведенням тепла ( $p = \text{const}$ ), при якому ступінь стиснення  $\varepsilon$  складає 13,5, а ступінь попереднього розширення  $\rho = 2,1$ . Визначити всі величини з пунктів 1-3 завдання.

### Рішення

Визначаємо молекулярну масу робочого тіла

$$\mu = 14 + 3 \cdot 1 = 17 \left( \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right).$$

Газова постійна для аміаку:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{17} = 489 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right) = 0,489 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

Початкові тиск і температура робочої речовини в одиницях системи СІ:

$$p_1 = 1,2 \text{ бар} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ (Па)} = 0,12 \text{ (МПа)}; \quad T_1 = 273 + 7 = 280 \text{ К}.$$

Маса аміаку обчислюється за наступною формулою:

$$m = \frac{\rho_1 V_1}{RT_1} = \frac{1,2 \cdot 10^5 \cdot 1,1}{489 \cdot 280} = 0,96 \text{ (кг)}.$$

Молярні теплоємкості аміаку (багатоатомний газ) беремо з табл. 2  
Додатку:

$$\mu \dot{N}_v = 29,1 \left( \frac{\text{Адж}}{\text{кг} \cdot \text{Е}} \right); \quad \mu \dot{N}_d = 37,4 \left( \frac{\text{Адж}}{\text{кг} \cdot \text{Е}} \right).$$

Ізохорна і ізобарна масова теплоємність:

$$\dot{N}_v = \frac{\mu C_v}{\mu} = \frac{29,1}{17} = 1,71 \left( \frac{\text{Адж}}{\text{кг} \cdot \text{Е}} \right), \quad \dot{N}_p = \frac{\mu \dot{N}_d}{\mu} = \frac{37,4}{17} = 2,2 \left( \frac{\text{Адж}}{\text{кг} \cdot \text{Е}} \right).$$

Показник адиабати:

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{2,2}{1,71} = 1,29.$$

1. Визначення параметрів робочого тіла у вузлових точках циклу.

а) Точка 1, з даними  $t_1 = 7^\circ\text{C}$  (280К) і  $P_1 = 1,2 \cdot 10^5$  Па:

Початковий питомий об'єм

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{489 \cdot 280}{1,2 \cdot 10^5} = 1,14 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Внутрішня енергія і ентальпія на початку циклу

$$e_1 = C_v \cdot \dot{N}_1 = 1,71 \cdot 280 = 478,8 \left( \frac{\text{Адж}}{\text{кг}} \right),$$

$$i_1 = C_p \cdot \dot{N}_1 = 2,2 \cdot 280 = 616 \left( \frac{\text{Адж}}{\text{кг}} \right).$$

Ентропія на початку циклу визначається по формулі:

$$S_1 = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_n} - R \cdot \ln \frac{p_1}{p_n},$$

де  $T_n = 273$  К і  $p_n = 101325$  Па – температура і тиск газу за нормальних фізичних умов.

$$S_1 = 2,2 \cdot \ln \frac{280}{273} - 0,489 \cdot \ln \frac{1,2 \cdot 10^5}{101325} = -0,027 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

б) Точка 2 (процес 1-2 – адіабатне стиснення). Питомий об'єм аміаку в точці 2 після стиснення

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,14}{13,5} = 0,084 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Температура і тиск після адіабатного стиснення

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 280 \cdot 13,5^{0,29} = 588 \text{ (К)},$$

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k = 0,12 \cdot 13,5^{1,29} = 3,40 \text{ (МПа)}.$$

Калоричні параметри аміаку в точці 2 циклу

$$S_2 = C_p \ln \frac{T_2}{T_n} - R \ln \frac{p_2}{p_n} = 2,2 \cdot \ln \frac{588}{273} - 0,489 \cdot \ln \frac{3,4 \cdot 10^6}{101325} = -0,028 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

$$U_2 = C_v \cdot T_2 = 1,71 \cdot 588 = 1005 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right),$$

$$i_2 = C_p \cdot T_2 = 2,2 \cdot 588 = 1294 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right).$$

в) Точка 3 (процес 2-3 – ізобарне підведення тепла). Тиск в точці 3 дорівнює тиску в точці 2

$$p_3 = p_2 = 3,40 \text{ (МПа)}.$$

Температура і питомий об'єм після ізобарного нагрівання

$$T_3 = T_2 \cdot \rho = 588 \cdot 2,1 = 1235 \text{ (К)},$$

$$v_3 = v_2 \cdot \rho = 0,084 \cdot 2,1 = 0,176 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Калоричні параметри аміаку в точці 3 циклу

$$U_3 = C_v \cdot T_3 = 1,71 \cdot 1235 = 2111 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right),$$

$$i_3 = C_p \cdot T_3 = 2,2 \cdot 1235 = 2717 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right);$$

$$S_3 = C_p \ln \frac{T_3}{T_n} - R \ln \frac{p_3}{p_n} = 2,2 \cdot \ln \frac{1235}{273} - 0,489 \cdot \ln \frac{3,4 \cdot 10^6}{101325} = 1,602 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

г) Точка 4 (процес 3-4 – адіабатний розширення). Кінцевий питомий об'єм дорівнює початковому

$$\nu_4 = \nu_1 = 1,14 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Температура і тиск після адіабатного розширення

$$T_4 = T_3 \cdot \left( \frac{\rho}{\varepsilon} \right)^{k-1} = 1235 \cdot \left( \frac{2,1}{13,5} \right)^{0,29} = 727 \text{ (K)};$$

$$P_4 = \frac{RT_4}{\nu_4} = \frac{489 \cdot 727}{1,14} = 0,32 \text{ (МПа)}.$$

Калоричні параметри аміаку в точці 3 циклу

$$U_4 = C_v \cdot T_4 = 1,71 \cdot 727 = 1243 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right),$$

$$i_4 = C_p \cdot T_4 = 2,2 \cdot 727 = 1599 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right);$$

$$S_4 = C_p \ln \frac{T_4}{T_n} - R \ln \frac{p_4}{p_n} = 2,2 \cdot \ln \frac{727}{273} - 0,489 \cdot \ln \frac{0,32 \cdot 10^6}{101325} = 1,588 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \right).$$

2. Визначаємо зміну всіх калоричних параметрів процесу.

а) Процес 1-2 ( $S = \text{const}$ ):

$$\Delta U_{1-2} = m \cdot C_v (T_2 - T_1) = 0,96 \cdot 1,71 \cdot (589 - 280) = 507 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta I_{1-2} = m \cdot C_p (T_2 - T_1) = 0,96 \cdot 2,2 \cdot (589 - 280) = 653 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta S_{1-2} = 0.$$

Робота і теплота процесу 1-2

$$L_{1-2} = \frac{m}{k-1} \cdot (p_2 \nu_2 - p_1 \nu_1) = \frac{0,96}{1,29-1} \cdot 10^5 \cdot (34 \cdot 0,084 - 1,2 \cdot 1,14) = 501 \text{ (кДж)};$$

$$Q_{1-2} = 0.$$

б) Процес 2-3 ( $P = \text{const}$ ):

$$\Delta U_{2-3} = m \cdot C_v (T_3 - T_2) = 0,96 \cdot 1,71 \cdot (1235 - 589) = 1061 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta I_{2-3} = m \cdot C_p (T_3 - T_2) = 0,96 \cdot 2,2 \cdot (1235 - 589) = 1364 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta S_{2-3} = m C_p \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,96 \cdot 2,2 \cdot \ln \frac{1235}{589} = 1,564 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{K}} \right).$$

Робота і теплота процесу 2-3

$$L_{2-3} = m \cdot p_2 \cdot (\nu_3 - \nu_2) = 0,96 \cdot 3,4 \cdot 10^6 \cdot (0,084 - 0,176) = -300 \text{ (кДж)};$$

$$Q_{2-3} = m \cdot C_p (T_3 - T_2) = 0,96 \cdot 2,2 \cdot (1235 - 589) = 1364 \text{ (кДж)}.$$

в) Процес 3-4 ( $S = \text{const}$ ):

$$\Delta U_{3-4} = m \cdot C_v (T_4 - T_3) = 0,96 \cdot 1,71 \cdot (727 - 1235) = -834 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta L_{3-4} = m \cdot C_p (T_4 - T_3) = 0,96 \cdot 2,2 \cdot (727 - 1235) = -1073 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta S_{3-4} = 0 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{К}} \right).$$

Робота і теплота процесу 3-4

$$L_{3-4} = \frac{m}{k-1} \cdot (p_4 v_4 - p_3 v_3) = \frac{0,96}{1,29-1} \cdot 10^5 \cdot (3,2 \cdot 1,14 - 34 \cdot 0,176) = 773 \text{ (кДж)};$$

$$Q_{3-4} = 0.$$

г) Процес 4-1 ( $V = \text{const}$ ).

$$\Delta U_{4-1} = m \cdot C_v (T_1 - T_4) = 0,96 \cdot 1,71 \cdot (280 - 727) = -734 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta L_{4-1} = m \cdot C_p (T_1 - T_4) = 0,96 \cdot 2,2 \cdot (280 - 727) = -944 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta S_{4-1} = m C_v \ln \frac{T_1}{T_4} = 0,96 \cdot 1,71 \cdot \ln \frac{727}{280} = 1,566 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{К}} \right).$$

Робота і теплота процесу 4-1

$$Q_{4-1} = m \cdot C_v (T_1 - T_4) = 0,96 \cdot 1,71 \cdot (727 - 280) = 734 \text{ (кДж)};$$

$$L_{4-1} = 0.$$

3. Знаходимо основні характеристики циклу.

а) питома робота циклу:

$$l_u = \frac{\sum_{i=1}^4 L_i}{m} = \frac{501 - 300 + 773 + 0}{0,96} = 974 \text{ (кДж)}.$$

б) термічний ККД циклу:

$$\eta'_\tau = \frac{l_u}{Q_{2-3}} = \frac{974}{1364} = 0,714.$$

в) ефективність циклу:

$$\eta_{\text{ек}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} = 1 - \frac{280}{1235} = 0,773; \quad \sigma = \frac{\eta'_\tau}{\eta_{\text{ек}}} = \frac{0,714}{0,774} = 0,922.$$

Діаграми циклу (p-v і T-S) мають вигляд, аналогічний рис. 2. Вони будуються по чотирма точками в масштабі на міліметровому папері.



**Приклад розв'язання завдання 2**  
**(підведення тепла за  $v = \text{const}$ )**

**Дано:** Метан ( $\text{CH}_4$ ) масою  $m = 2$  кг, температурою  $t_1 = 7^\circ\text{C}$  і тиском  $p_1 = 1,2$  бар, здійснює цикл двигуна внутрішнього згоряння з ізохорним підведенням тепла ( $v = \text{const}$ ), при якому ступінь стиснення  $\varepsilon = 5$ , а ступінь підвищення тиску  $\lambda = 1,5$ . Визначити всі величини з пунктів 1-3 завдання.

**Рішення**

Визначаємо молекулярну масу робочого тіла

$$\mu = 1 \cdot 12 + 4 \cdot 1 = 16 \left( \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} \right).$$

Газова постійна для метану:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{16} = 520 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right) = 0,52 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

Початковий тиск і температура робочої речовини в одиницях системи СІ:

$$p_1 = 1,2 \text{ бар} = 1,2 \cdot 10^5 (\text{Па}) = 0,12 (\text{МПа}); \quad T_1 = 273 + 7 = 280 \text{ К}.$$

Початковий об'єм метану обчислюється за наступною формулою:

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{2 \cdot 520 \cdot 280}{1,2 \cdot 10^5} = 2,4 (\text{м}^3).$$

Молярні теплоємності метану (багатоатомний газ) беремо з табл. 2 Додатку:

$$\mu \dot{N}_v = 29,1 \left( \frac{\text{Адж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right); \quad \mu \dot{N}_d = 37,4 \left( \frac{\text{Адж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

Ізохорна і ізобарна масова теплоємність:

$$C_v = \frac{\mu C_v}{\mu} = \frac{29,1}{16} = 1,82 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right), \quad C_p = \frac{\mu C_p}{\mu} = \frac{37,4}{16} = 2,34 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

Показник адіабати:

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \frac{2,34}{1,82} = 1,29.$$

1. Визначення параметрів робочого тіла у вузлових точках циклу.

а) Точка 1, з даними  $t_1 = 7^\circ\text{C}$  (280К) і  $P_1 = 1,2 \cdot 10^5$  Па:

Початковий питомий об'єм

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{2,4}{2} = 1,2 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Внутрішня енергія і ентальпія на початку циклу

$$u_1 = C_v \cdot T_1 = 1,82 \cdot 280 = 509,6 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right),$$

$$i_1 = C_p \cdot T_1 = 2,34 \cdot 280 = 655,2 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Ентропія на початку циклу визначається по формулі:

$$S_1 = C_p \cdot \ln \frac{T_1}{T_n} - R \cdot \ln \frac{p_1}{p_n},$$

де  $T_n = 273 \text{ К}$  і  $p_n = 101325 \text{ Па}$  – температура і тиск газу за нормальних фізичних умов.

$$S_1 = 2,34 \cdot \ln \frac{280}{273} - 0,52 \cdot \ln \frac{1,2 \cdot 10^5}{101325} = -0,030 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

б) Точка 2 (процес 1-2 – адіабатне стиснення). Питомий об'єм аміаку в точці 2 після стиснення

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,2}{5} = 0,24 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Температура і тиск після адіабатного стиснення

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 280 \cdot 5^{0,29} = 447 \text{ (К)},$$

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k = 0,12 \cdot 5^{1,29} = 0,96 \text{ (МПа)}.$$

Калоричні параметри метану в точці 2 циклу

$$S_2 = C_p \ln \frac{T_2}{T_n} - R \ln \frac{p_2}{p_n} = 2,34 \cdot \ln \frac{447}{273} - 0,52 \cdot \ln \frac{0,96 \cdot 10^6}{101325} = -0,020 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

$$U_2 = C_v \cdot T_2 = 1,82 \cdot 447 = 814 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right),$$

$$i_2 = C_p \cdot T_2 = 2,34 \cdot 447 = 1046 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right).$$

в) Точка 3 (процес 2-3 – ізохорне підведення тепла). Тиск в точці 3 в  $\lambda$  разів більше, ніж в точці 2

$$p_3 = \lambda p_2 = 1,5 \cdot 0,96 = 1,44 \text{ (МПа)}.$$

Питомий об'єм при нагріванні не змінився

$$v_3 = v_2 = 0,24 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right).$$

Температура після ізохорного нагрівання

$$T_3 = \frac{p_3 \cdot \nu_3}{R} = \frac{1,44 \cdot 10^6 \cdot 0,24}{520} = 665 (K).$$

Калоричні параметри метану в точці 3 циклу

$$U_3 = C_v \cdot T_3 = 1,82 \cdot 665 = 1210 \left( \frac{\kappaДж}{кг} \right),$$

$$i_3 = C_p \cdot T_3 = 2,34 \cdot 665 = 1556 \left( \frac{\kappaДж}{кг} \right);$$

$$S_3 = C_p \ln \frac{T_3}{T_n} - R \ln \frac{p_3}{p_n} = 2,34 \cdot \ln \frac{665}{273} - 0,52 \cdot \ln \frac{1,44 \cdot 10^6}{101325} = 0,703 \left( \frac{\kappaДж}{кг \cdot K} \right).$$

г) Точка 4 (процес 3-4 – адіабатний розширення). Кінцевий питомий об'єм дорівнює початковому

$$\nu_4 = \nu_1 = 1,2 \left( \frac{м^3}{кг} \right).$$

Температура і тиск після адіабатного розширення

$$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{k-1}} = \frac{665}{5^{0,29}} = 417 (K); \quad P_4 = \frac{RT_4}{\nu_4} = \frac{520 \cdot 417}{1,2} = 0,18 (МПа).$$

Калоричні параметри аміаку в точці 3 циклу

$$U_4 = C_v \cdot T_4 = 1,82 \cdot 417 = 759 \left( \frac{\kappaДж}{кг} \right),$$

$$i_4 = C_p \cdot T_4 = 2,34 \cdot 417 = 976 \left( \frac{\kappaДж}{кг} \right);$$

$$S_4 = C_p \ln \frac{T_4}{T_n} - R \ln \frac{p_4}{p_n} = 2,34 \cdot \ln \frac{417}{273} - 0,52 \cdot \ln \frac{0,18 \cdot 10^6}{101325} = 0,69 \left( \frac{\kappaДж}{кг \cdot K} \right).$$

2. Визначаємо зміну всіх калоричних параметрів процесу.

а) Процес 1-2 ( $S = \text{const}$ ):

$$\Delta U_{1-2} = m \cdot C_v (T_2 - T_1) = 2 \cdot 1,82 \cdot (447 - 280) = 608 (\kappaДж);$$

$$\Delta I_{1-2} = m \cdot C_p (T_2 - T_1) = 2 \cdot 2,34 \cdot (447 - 280) = 782 (\kappaДж);$$

$$\Delta S_{1-2} = 0.$$

Робота і теплота процесу 1-2

$$L_{1-2} = \frac{m}{k-1} \cdot (P_2 \nu_2 - P_1 \nu_1) = \frac{2}{1,29-1} \cdot 10^5 \cdot (9,6 \cdot 0,24 - 1,2 \cdot 1,2) = 596 (\kappaДж);$$

$$Q_{1-2} = 0.$$

б) Процес 2-3 ( $\nu = \text{const}$ ):

$$\Delta U_{2-3} = m \cdot C_v (T_3 - T_2) = 2 \cdot 1,82 \cdot (665 - 447) = 794 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta M_{2-3} = m \cdot C_p (T_3 - T_2) = 2 \cdot 2,34 \cdot (665 - 447) = 1020 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta S_{2-3} = m C_v \ln \frac{T_3}{T_2} = 2 \cdot 1,82 \cdot \ln \frac{665}{447} = 1,45 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{К}} \right).$$

Робота і теплота процесу 2-3

$$L_{2-3} = 0 \text{ (кДж)};$$

$$Q_{2-3} = m \cdot C_v (T_3 - T_2) = 2 \cdot 1,82 \cdot (665 - 447) = 794 \text{ (кДж)}.$$

в) Процес 3-4 ( $S = \text{const}$ ):

$$\Delta U_{3-4} = m \cdot C_v (T_4 - T_3) = 2 \cdot 1,82 \cdot (417 - 665) = -903 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta M_{3-4} = m \cdot C_p (T_4 - T_3) = 2 \cdot 2,34 \cdot (417 - 665) = -1161 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta S_{3-4} = 0 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{К}} \right).$$

Робота і теплота процесу 3-4

$$L_{3-4} = \frac{m}{k-1} \cdot (P_4 v_4 - P_3 v_3) = \frac{2}{1,29-1} \cdot 10^5 \cdot (1,8 \cdot 1,2 - 14,4 \cdot 0,24) = -894 \text{ (кДж)};$$

$$Q_{3-4} = 0.$$

г) Процес 4-1 ( $v = \text{const}$ ).

$$\Delta U_{4-1} = m \cdot C_v (T_1 - T_4) = 2 \cdot 1,82 \cdot (280 - 417) = -499 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta M_{4-1} = m \cdot C_p (T_1 - T_4) = 2 \cdot 2,34 \cdot (280 - 417) = -641 \text{ (кДж)};$$

$$\Delta S_{4-1} = m C_v \ln \frac{T_1}{T_4} = 2 \cdot 1,82 \cdot \ln \frac{417}{280} = 1,450 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{К}} \right).$$

Робота і теплота процесу 4-1

$$Q_{4-1} = m \cdot C_v (T_1 - T_4) = 2 \cdot 1,82 \cdot (280 - 417) = -499 \text{ (кДж)};$$

$$L_{4-1} = 0.$$

3. Основні характеристики циклу: питома робота, термічний ККД і ефективність циклу знаходяться за формулами, що наведені в пункті 3 попереднього прикладу.

Діаграми циклу ( $p$ - $v$  і  $T$ - $S$ ) мають вигляд, аналогічний рис. 1. Вони будуються за чотирма точками в масштабі на міліметровому папері.

### 3. Теплообмін при обтіканні пучка труб

#### Теоретичні відомості

На практиці часто доводиться мати справу з поперечним обтіканням пучків труб. При цьому з'являються закономірності, що не є характерними для обтікання потоком одиночної труби.

Найбільш поширеними типами пучків є шаховий і коридорний (рис. 3а, б).

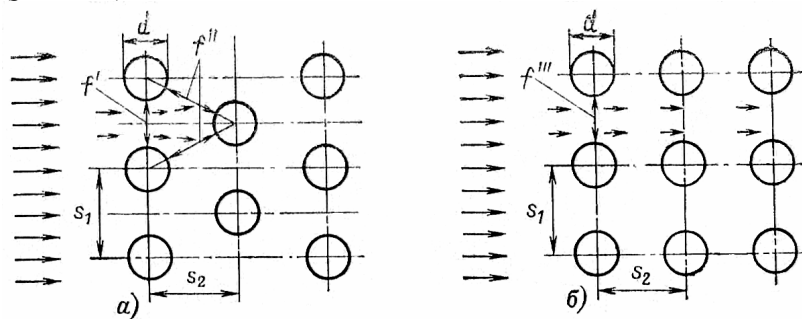


Рис. 3. Шаховий і коридорний трубні пучки.

Обтікання першого ряду в пучках обох типів аналогічне обтіканню одиночної труби. Характер обтікання труб в наступних рядах шахового пучка приблизно такий же, оскільки труби наступного ряду зміщені поперек потоку і не потрапляють в вихровий слід попередньої труби. При обтіканні коридорного пучка на труби другого ряду діють вихрі, що утворюються при обтіканні труб першого ряду, тому тепловіддача змінюється.

Найменший середній коефіцієнт тепловіддачі має перший ряд, далі тепловіддача збільшується і стабілізується після третього ряду. Коефіцієнт тепловіддачі третього і наступних рядів має сталі значення.

Найбільш характерним при обтіканні пучків труб є змішаний режим руху, за якого в просторі між трубами має місце турбулентний потік, а на передній половині труби формується шар рідини, що рухається ламінарно. Змішаний режим руху рідини реалізується за наступних чисел Рейнольдса

$$10^3 < Re = \frac{w_0 d \rho}{\mu} < 10^5,$$

де  $w_0$  – швидкість в даному перерізі пучка,  $d$  – зовнішній діаметр труби,  $\rho$  і  $\mu$  – густина і в'язкість рідини за середньої температури.

Середній коефіцієнт тепловіддачі третього і наступних рядів розраховують за формулою

$$Nu_d = C Re^m Pr_{pid}^{0,33} \left( \frac{Pr_{pid}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \varepsilon_s,$$

де  $C$ ,  $m$  і  $\varepsilon_s$  – коефіцієнти, що залежать від номера ряду.

*Кут атаки* – кут між напрямом потоку, що набігає, і віссю труби. Максимальна тепловіддача має місце, якщо напрям руху потоку перпендикулярний до вісі труби ( $\psi = 90^\circ$ ). При  $\psi < 90^\circ$  тепловіддача зменшується і знаходиться по формулі

$$\bar{\alpha}_\psi = \bar{\alpha} \varepsilon_\psi,$$

де  $\varepsilon_\psi$  визначається по графіку на рис. 4. Коефіцієнт тепловіддачі визначають за наступною формулою

$$\bar{\alpha} = \alpha_1 \cdot \varepsilon_{cp},$$

де  $\alpha_1$  – коефіцієнт тепловіддачі від пари до поверхні верхньої труби

$$\alpha_1 = \frac{Re r \rho^l \nu}{(t_n - t_{cm}) \cdot 4\pi R},$$

а коефіцієнт зниження теплообміну на нижніх рядах горизонтальних труб при конденсації

$$\varepsilon_{cp} = \frac{\sum \varepsilon_i}{n},$$

де  $n$  – кількість рядів по вертикалі, значення коефіцієнтів  $\varepsilon_i$  береться з табл. 4. Додатку в залежності від кількості рядів і їх розташування.

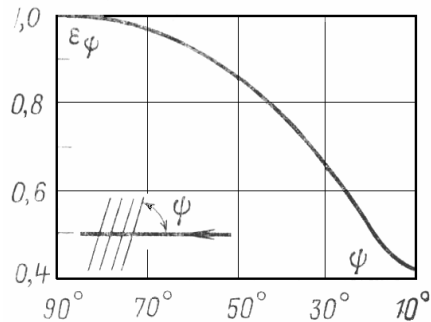


Рис. 4. Зміна коефіцієнту  $\varepsilon_\psi$ .

Для найбільш поширеного змішаного режиму руху тепловіддача шахових пучків вища ніж коридорних, причому ця різниця зменшується при збільшенні числа Рейнольдса. Тому в ряді випадків шаховим пучкам віддають перевагу.

### Завдання 3

**Дано:** у горизонтальному кожухотрубному конденсаторі охолодження сухої насиченої пари робочого тіла здійснюється водою, що рухається по трубах із зовнішнім діаметром  $d$ . Труби мають шахове (коридорне) розташування, число рядів по вертикалі  $n$ . Середня температура зовнішньої поверхні труб  $t_{ст}$ . Тиск конденсації  $P$  і відповідна йому температура насичення  $t_n$ .

**Визначити:** середнє значення коефіцієнта тепловіддачі з боку сухої насиченої пари, що конденсується. Зобразити принципову схему конденсатора (поперечний і подовжній розріз). Дані взяті з таблиці 3 згідно номеру шифру.

Таблиця №3

Перед-остання цифра шифру	d, мм	n	Розташування труб	Остання цифра шифру	Робоче тіло	Параметри конденсату		Температури поверхні труби $t_{ст}$ , °C
						Тиск P, бар	Температура $t_n$ , °C	
0	10	5	шахове	0	вода	0,074	40	25
1	12	6	коридорне	1	аміак	15,544	40	30
2	16	7	шахове	2	фреон12	9,595	40	32
3	20	5	коридорне	3	фреон22	12,023	30	21
4	25	6	шахове	4	аміак	11,665	30	25
5	10	7	коридорне	5	фреон12	7,445	30	24
6	12	8	шахове	6	фреон22	15,485	40	32
7	16	5	коридорне	7	вода	0,312	70	50
8	20	6	шахове	8	вода	0,123	50	30
9	25	7	коридорне	9	фреон12	12,146	50	40

### Приклад розв'язання завдання 3

**Дано:** у горизонтальному кожухотрубному конденсаторі суха насичена пара аміаку охолоджується водою, що рухається по трубах із зовнішнім діаметром  $d = 25$  мм. Число рядів по вертикалі  $n = 7$ , розташування труб – шахове. Середня температура зовнішньої поверхні труб  $t_{ст} = 16,5$ °C. Тиск конденсації  $P = 8,575$  бар, що відповідає температурі насичення  $t_n = 20$ °C. Знайти середнє значення коефіцієнта тепловіддачі з боку сухої насиченої пари, що конденсується.

### Рішення

Фізичні характеристики аміаку при  $t_n = 20^\circ\text{C}$  (Додаток, табл. №7): теплота пароутворення  $r = 1,19$  МДж/кг, густина  $\rho = 610,3$  кг/м<sup>3</sup>, коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu = 0,249 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda = 0,494$  Вт/(м·К).

Приведена довжина визначається за формулою:

$$Z = (t_i - t_{\dot{n}\dot{n}}) \cdot \pi R \cdot \left(\frac{g}{\nu^2}\right)^{1/3} \cdot \frac{\lambda}{r\rho/\nu},$$

де  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння,  $R = d/2$  – зовнішній радіус труби. Підставляємо значення

$$Z = (20 - 16,5) \cdot 3,14 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{9,81}{0,249^2 \cdot 10^{-12}}\right)^{1/3} \times \\ \times \frac{0,494}{1,19 \cdot 10^6 \cdot 610,3 \cdot 0,249 \cdot 10^{-6}} = 20,3.$$

Знаходимо допоміжний коефіцієнт

$$R_e = 3,25 \cdot Z^{0,75} = 3,25 \cdot 20,3^{0,75} = 31,08.$$

Коефіцієнт тепловіддачі для верхнього (першого) ряду труб:

$$\alpha_1 = \frac{R_e r \rho / \nu}{(t_i - t_{\dot{n}\dot{n}}) \cdot 4\pi R} = \frac{31,08 \cdot 1,19 \cdot 10^6 \cdot 610,3 \cdot 0,249 \cdot 10^{-6}}{(20 - 16,5) \cdot 3,14 \cdot 12,5 \cdot 10^{-2} \cdot 4} = \\ = 10200 \left( \frac{\dot{A}\dot{n}}{\dot{\epsilon}^2 \cdot E} \right).$$

Коефіцієнт, що враховує погіршення інтенсивності тепловіддачі на нижніх рядах труб пучка, обумовлене стіканням конденсату з верхніх рядів труб на нижні визначається по табл. 4 Додатку:

$$\varepsilon_{\dot{n}\dot{d}} = \frac{\sum \varepsilon_i}{d} = \frac{1 + 0,98 + 0,90 + 0,82 + 0,75 + 0,68 + 0,61}{7} = 0,82.$$

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі для першого ряду труб:

$$\bar{\alpha} = \alpha_1 \cdot \varepsilon_{\dot{n}\dot{d}} = 10200 \cdot 0,82 = 8364 \left( \frac{\dot{A}\dot{n}}{\dot{\epsilon}^2 \cdot E} \right).$$



#### 4. Теплопередача через плоску стінку

##### Теоретичні відомості

*Теплообмін* – процес передачі теплоти в середовищі з неоднорідним розподілом температури. Існує три механізми теплообміну: теплопровідність, конвекція та випромінювання.

**Закон Фур'є:** густина теплового потоку пропорційна градієнту температури

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T,$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, який характеризує індивідуальні фізичні властивості речовини. Знак "–" показує, що теплота поширюється по напрямку зменшення температури.

В *газах* перенос теплоти здійснюється за рахунок переміщення молекул із холодної області в гарячу. Для газів величина коефіцієнту

$$\lambda = 0,006 - 0,06 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right).$$

Найбільше значення  $\lambda$  мають гелій і водень завдяки малій вазі і дуже високій рухливості.

В *рідинах* кожна молекула коливається довкола положення рівноваги, стикаючись з сусідніми молекулами. Теплота передається шляхом поширення цих коливань. Для рідин величина коефіцієнту

$$\lambda = 0,07 - 0,7 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right).$$

В *металах* носіями теплоти є вільні електрони, тому значення коефіцієнту  $\lambda$  досягають великих значень, особливо для чистих металів

$$\lambda = 20 - 400 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right).$$

В *діелектриках*, які використовуються в будівництві, коефіцієнт  $\lambda$  залежить від їх вологості та пористості і може приймати значення

$$\lambda = 0,023 - 2,9 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right).$$

*Теплоізоляційні* – матеріали з низьким значенням коефіцієнту теплопровідності ( $\lambda < 0,25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ). Коефіцієнт теплопровідності залежить від температури, його визначають експериментальним шляхом.

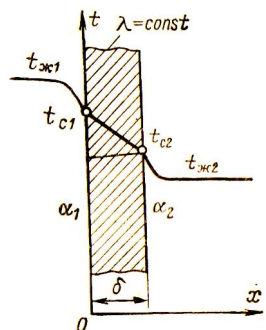
*Теплопередача* – теплообмін між двома теплоносіями через тверду стінку, що їх розділяє.

*Тепловіддача* – теплообмін між рідиною і поверхнею твердої стінки, яку рідина омиває. Щільність теплового потоку при тепловіддачі визначається по закону Ньютона-Ріхмана

$$q = \alpha \cdot (T_{dla} - \check{N}_{in}),$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі. Він дорівнює кількості теплоти, що переноситься в одиницю часу через одиницю поверхні стінки при різниці температур в 1 К між рідиною і поверхнею стінки.

Розглянемо випадок теплопередачі через плоску стінку (рис. 5).



При стаціонарному режимі щільність теплового потоку

$$\frac{dq}{dx} = 0 \Rightarrow q = const.$$

Щільність теплового потоку, що передається від рідини 1 зовнішній поверхні стінки

$$q = \alpha_1 (t_{dla1} - t_{in1}).$$

Рис.5 Теплопередача крізь плоску стінку.

Щільність теплового потоку, що передається від зовнішньої до внутрішньої поверхні стінки

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}).$$

Щільність теплового потоку, що передається від внутрішньої поверхні стінки рідині 2

$$q = \alpha_2 (t_{in2} - t_{dla2}).$$

Склавши всі три вирази отримуємо для щільності теплового потоку

$$q = \frac{t_{dla1} - t_{dla2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

*Коефіцієнт теплопередачі* – щільність теплового потоку при різниці температур теплоносіїв в 1 К

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \left( \frac{A \check{n}}{\epsilon^2 \cdot E} \right).$$

*Термічний опір теплопередачі* – сума термічних опорів теплопередачі і термічного опору теплопровідності

$$R = \frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

#### Завдання 4

Котел для приготування цукрового сиропу складається з мідної чаші ( $\lambda_m = 384$  Вт/(м·К)) із стінкою товщиною  $\delta_m$  і сорочки із сталі ( $\lambda_{ст} = 45,6$  (Вт/(м·К)) товщиною  $\delta_{ст}$ .

У простір між стінками котла поступає водяна пара, що конденсується при температурі  $t_n$  ( $\alpha_n = 6240$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Всередині котла знаходиться сироп, що кипить при температурі  $t_c$  ( $\alpha_c = 1430$  Вт/м<sup>2</sup>·К). Температура повітря в цеху  $t_{пов}$ , коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря  $\alpha_{пов}$ .

Для зменшення втрат тепла зовнішню поверхню котла покривають шаром азбестового волокна ( $\lambda_a = 0,11$  Вт/(м·К)) завтовшки  $\delta_a$  з обшивкою фанери ( $\lambda_f = 0,19$  Вт/(м·К)) завтовшки  $\delta_f$ . Визначити: ефективність ізоляції, тобто відсоток втрат тепла до і після ізоляції, відносне зменшення втрат і відсоток економії тепла в результаті ізоляції. Зобразити схему теплопередачі через стінку котла для приготування цукрового сиропу (розріз).

Вказівки: стінку котла з причини значних розмірів вважати плоскою.

Таблиця 4

Перед-остання цифра шифру	$\delta_m$ , мм	$\delta_{ст}$ , мм	$\delta_a$ , мм	$\delta_f$ , мм	Остання цифра шифру	$t_m$ , °C	$t_c$ , °C	$t_{пов}$ , °C	$\alpha_{пов}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К
0	2	2	50	2	0	120	103	25	17
1	4	3	50	4	1	125	105	26	20
2	3	3	55	3	2	128	106	27	18
3	3	4	45	4	3	130	108	28	22
4	4	4	55	2	4	126	105	29	19
5	2	4	60	3	5	124	105	30	20
6	2	3	55	2	6	126	103	24	21
7	3	2	40	4	7	120	105	27	19
8	4	2	45	3	8	130	106	26	18
9	4	4	60	4	9	125	104	25	17

#### Приклад розв'язання завдання 4

Вирішити завдання 4 за наступних даних: товщина мідної чаші  $\delta_m = 4$  мм; товщина сталеві сорочки  $\delta_c = 4$  мм; товщина шару азбестового волокна  $\delta_a = 55$  мм; товщина обшивки з фанери  $\delta_f = 2$  мм;

температура водяної пари  $t_n = 126^\circ\text{C}$ ; температура сиропу  $t_c = 105^\circ\text{C}$ ; температура повітря  $t_{нов} = 29^\circ\text{C}$ ; коефіцієнт тепловіддачі повітря  $\alpha_{нов} = 19 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

### Рішення

Кількість тепла, що корисно віддається від пари, що конденсується, до киплячого сиропу з  $1\text{м}^2$  внутрішньої поверхні котла:

$$q_1 = \frac{t_n - t_{\dot{n}}}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{\dot{e}}}{\lambda_{\dot{e}}} + \frac{1}{\alpha_{\dot{n}}}} = \frac{126 - 105}{\frac{1}{6240} + \frac{0,004}{384} + \frac{1}{430}} = 8400 \left( \frac{\dot{A}\dot{n}}{\dot{e}^2 \cdot E} \right).$$

Втрати тепла через зовнішню стінку парової сорочки в навколишнє повітря за відсутності ізоляції визначаються за формулою:

$$q_2 = \frac{t_n - t_{d\dot{i}\dot{a}}}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{\dot{n}}}{\lambda_{\dot{n}}} + \frac{1}{\alpha_{d\dot{i}\dot{a}}}} = \frac{126 - 29}{\frac{1}{6240} + \frac{0,004}{45,6} + \frac{1}{19}} = 1834 \left( \frac{\dot{A}\dot{n}}{\dot{e}^2 \cdot E} \right).$$

тепла від стінки парової сорочки в повітря за наявності ізоляції:

$$q_3 = \frac{t_n - t_{d\dot{i}\dot{a}}}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{\dot{n}}}{\lambda_{\dot{n}}} + \frac{\delta_{\dot{r}}}{\lambda_{\dot{r}}} + \frac{\delta_{\dot{o}}}{\lambda_{\dot{o}}} + \frac{1}{\alpha_{d\dot{i}\dot{a}}}} = \frac{126 - 29}{\frac{1}{6240} + \frac{0,004}{45,6} + \frac{0,055}{0,11} + \frac{0,004}{0,19} + \frac{1}{19}} = 169 \left( \frac{\dot{A}\dot{n}}{\dot{e}^2 \cdot E} \right).$$

Величина втрат тепла до ізоляції:

$$\sigma_1 = \frac{q_2}{q_1 + q_2} \cdot 100\% = \frac{1834}{8400 + 1834} \cdot 100\% = 17,9\% .;$$

Величина втрат тепла після ізоляції:

$$\sigma_2 = \frac{q_3}{q_1 + q_3} \cdot 100\% = \frac{169}{8400 + 169} \cdot 100\% = 2,0\%.$$

Відносне зменшення втрат в результаті ізоляції:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{q_2}{q_3} = \frac{1834}{169} = 10,9 \text{ разу.}$$

Економія тепла в результаті ізоляції:

$$\dot{Y}_{\dot{n}} = \frac{q_2 - q_3}{q_1 + q_2} \cdot 100\% = \frac{1834 - 169}{8400 + 1834} \cdot 100\% = 16,3\%.$$

## МОДУЛЬ 2

### 5. Термічний опір багатошарової стінки

#### Теоретичні відомості

*Теплопровідність* – вид теплообміну, при якому носіями теплоти є мікрочастинки, що переміщуються з області з більш високою температурою в область з меншою температурою.

*Теплопередача* – теплообмін між двома теплоносіями через тверду стінку, що їх розділяє.

*Температурне поле* – сукупність значень температури в усіх точках тіла в даний момент часу.

*Стаціонарне поле* – розподіл температур в різних точках тіла з часом не змінюється.

*Нестаціонарне поле* – розподіл температур в різних точках тіла з часом змінюється.

*Однорідне поле* – всі точки тіла мають однакову температуру.

*Ізотермічна поверхня* – поверхня, всі точки якої мають однакову температуру. Кожній ізотермічній поверхні відповідає своє значення температури.

Побудувавши сімейство ізотерм, можна отримати наглядне уявлення про розподіл температури в тілі. Ізотерми ніколи не перетинаються. Вздовж ізотерми переносу теплоти не відбувається, а найбільш інтенсивно перенос теплоти відбувається в напрямі нормалі до ізотерми.

*Багатошарова* – стінка, кожен шар якої є однорідною стінкою. Температури поверхонь, що контактують, однакові, ізотермічні поверхні паралельні граничним площинам (рис. 6).

Щільність теплового потоку не змінюється при переході від однієї ізотермічної поверхні до іншої. Для кожного шару стінки маємо

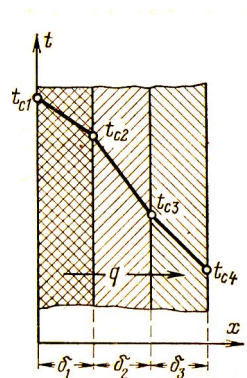


Рис.6 Багатошарова плоска стінка.

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{c1} - t_{c2}) \Rightarrow q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = t_{c1} - t_{c2}, \quad q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_{c2} - t_{c3}) \Rightarrow q \frac{\delta_2}{\lambda_2} = t_{c2} - t_{c3},$$

$$q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_{c3} - t_{c4}) \Rightarrow q \frac{\delta_3}{\lambda_3} = t_{c3} - t_{c4}.$$

Додаємо отримані рівняння і отримуємо формулу теплового потоку для багатошарової стінки

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{t_{c1} - t_{c(n+1)}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}.$$

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності – коефіцієнт теплопровідності уявної одношарової стінки з еквівалентною товщиною  $\delta_{екв}$  і теплопровідністю  $\lambda_{екв}$ , котра має такий же термічний опір, що й дана багатошарова. Умова еквівалентності

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_{екв}}{\lambda_{екв}}.$$

*Коефіцієнт теплопередачі* – щільність теплового потоку при різниці температур теплоносіїв в 1 К. Для багатошарової стінки

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \left( \frac{A\dot{n}}{\epsilon^2 \cdot E} \right).$$

*Термічний опір теплопередачі* – сума термічних опорів теплопередачі і термічного опору теплопровідності

$$R = \frac{1}{\epsilon} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

### Завдання 5

**Дано:** Розрахувати термічний опір зимового одягу і визначити витрати теплоти з 1м<sup>2</sup> одягу, що складається з підкладки, шару ватину товщиною  $\delta_1$  мм, з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_1 = 0,029$  Вт/(м·К); шару драпу товщиною  $\delta_3$  мм, з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_3 = 0,06$  Вт/(м·К); між цими шарами повітряний прошарок завтовшки  $\delta_2$  з коефіцієнтом  $\lambda_2 = 0,023$  Вт/(м·К). Температуру внутрішньої поверхні одягу прийняти  $t_{внут} = 30^0$ С. Зовнішня поверхня одягу оточена повітрям з температурою  $t_{зов}$ , °С. Коефіцієнт тепловіддачі від одягу до повітря  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Розрахувати температуру на границі шарів і побудувати в масштабі графік її зміни по товщині пакету одягу.

Температуру навколишнього повітря  $t_{зов}$  і коефіцієнт тепловіддачі вибрати з таблиці 5 по останній цифрі залікової книжки. Товщину ватину, повітряного прошарку і драпу вибрати там же за

передостанньою цифрою варіанту. Термічним опором підкладки вати нехтувати.

Таблиця №5

Параметр, одиниця вимірювання	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
<b>Передостання цифра шрифту</b>										
Температура навколишнього повітря $t_{\text{зов}}, ^\circ\text{C}$	7	10	5	0	10	-25	-15	-20	-5	-12
Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	12	15	20	25	8	12	17	7	10	5
<b>Остання цифра шрифту</b>										
Товщина ватину $\delta_1$ , мм	15	10	12	8	20	17	13	12	13	11
Товщина повітряного прошарку $\delta_2$ , мм	2	4	5	3	8	7	2	6	4	3
Товщина драпу $\delta_3$ , мм	3	3,5	4	3,2	3	2	2,4	1,8	2,5	2,2

#### Приклад розв'язання завдання 5

Розрахувати термічний опір зимового одягу і визначити витрати теплоти з 1м<sup>2</sup> одягу, що складається з підкладки, шару ватину товщиною  $\delta_1 = 12$  мм, з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_1 = 0,029$  Вт/(м·К); шару драпу товщиною  $\delta_3 = 2$  мм, з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_3 = 0,06$  Вт/(м·К); між цими шарами повітряний прошарок завтовшки  $\delta_2 = 3$  мм з коефіцієнтом  $\lambda_2 = 0,023$  Вт/(м·К). Температуру внутрішньої поверхні одягу прийняти  $t_{\text{внут}} = 30^\circ\text{C}$ . Зовнішня поверхня одягу оточена повітрям з температурою  $t_{\text{зов}} = -4^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт тепловіддачі від одягу до повітря  $\alpha_3 = 14$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

#### Рішення

Зимовий одяг можна розглядати як багатошарову стінку, термічний опір кожного шару можна визначити по формулі:

$$R = \frac{1}{e} = \sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_3}.$$

Термічний опір пакету зимового одягу визначається як сума термічних опорів окремих шарів і термічного опору теплопровідності:

$$R = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_3} = \frac{0,012}{0,029} + \frac{0,003}{0,023} + \frac{0,002}{0,06} + \frac{1}{14} = 0,648 \left( \frac{e^2 \cdot E}{\hat{A} \hat{n}} \right).$$

Втрати теплоти через 1м<sup>2</sup> зимового одягу:

$$q = \frac{t_{ai0n} - t_{ci0a}}{R} = \frac{30 - (-4)}{0,648} = 55,5 \left( \frac{A\ddot{n}}{e^2} \right).$$

Температуру між першим і другим шарами знайдемо за формулою:

$$t_{c1} = t_{ai0n} - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 30 - 55,5 \cdot \frac{0,012}{0,029} = 7 (^{\circ}N).$$

Температура між другим і третім шарами:

$$t_{c2} = t_{c1} - q \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 7 - 55,5 \cdot \frac{0,003}{0,023} = -0,2 (^{\circ}N).$$

Температура між третім і четвертим шарами:

$$t_{c3} = t_{c2} - q \frac{\delta_3}{\lambda_3} = -0,2 - 55,5 \cdot \frac{0,002}{0,06} = -2 (^{\circ}N).$$

Будемо в масштабі графік зміни температури по товщині пакету одягу (по осі  $y$  – температура, по осі  $x$  – товщина зимового пакету одягу, рис. 7).

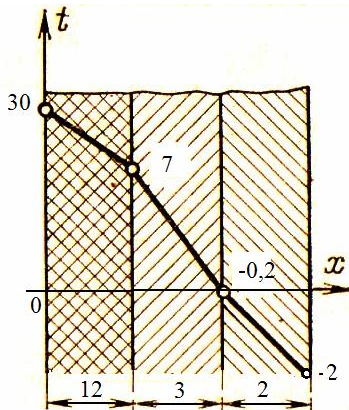


Рис. 7. Графік зміни температури по товщині одягу.



## 6. Розрахунок теплообмінних апаратів

### Теоретичні відомості

*Теплообмінник* – апарат, в якому здійснюється теплообмін між теплоносіями або теплоносієм і твердим тілом.

*Теплоносій* – рухоме середовище, що використовується для перенесення теплоти.

Всі теплообмінники поділяють на контактні та поверхневі. Більш поширеними є поверхневі теплообмінники, які в свою чергу діляться на регенеративні та рекуперативні.

*Контактні* – теплообмінники, в яких перенесення теплоти відбувається в процесі безпосереднього контакту теплоносіїв (газ і крапельна рідина).

*Регенеративні* – теплообмінники періодичної дії. Наприклад, продукти згоряння палива нагрівають насадку, крізь яку потім проходить холодний газ.

*Рекуперативні* – теплообмінники, в яких теплоносії розділені твердою стінкою. За напрямом руху теплоносіїв ці теплообмінники бувають з прямотоком, протитоком і перехресним током.

*Прямоток* – теплоносії, розділені стінкою, рухаються в одному напрямку.

*Протиток* – теплоносії рухаються на зустріч один одному.

*Перехресний ток* – теплообмінник, в якому другий теплоносій рухається поперек напрямку руху першого.

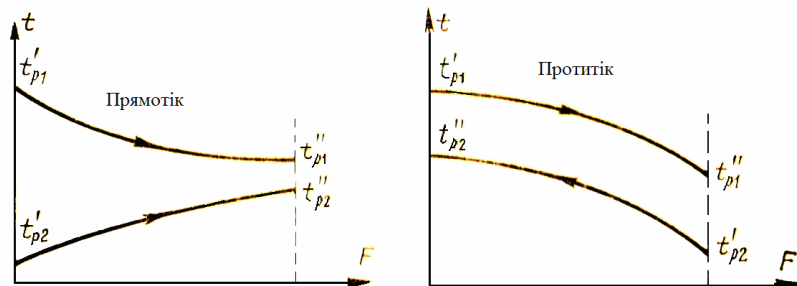


Рис. 8. Зміна температури теплоносіїв (прямотік і протитік).

Розрізняють два види розрахунків теплообмінних апаратів: проектний – розрахунок для визначення площі поверхні теплообміну і повірочний – для визначення теплового потоку і температур теплоносіїв. При обох розрахунках складають два рівняння:

1. Рівняння теплового балансу – кількість теплоти, що відбирається в одиницю часу від гарячого теплоносія, дорівнює кількості теплоти, що отримав холодний теплоносіє

$$Q = G_1 \dot{N}_{p1} (t'_{c1} - t''_{c1}) = G_2 \dot{N}_{p2} (t''_{c2} - t'_{c2}).$$

2. Рівняння теплопередачі – кількість теплоти  $Q$ , що передається через стінку, яка розділяє теплоносії, визначається за формулою

$$Q = k \bar{\Delta t} F,$$

де середній температурний напір

$$\bar{\Delta t} = \frac{(t''_{c1} - t'_{c2}) - (t'_{c1} - t''_{c2})}{\ln \frac{t''_{c1} - t'_{c2}}{t'_{c1} - t''_{c2}}}.$$

Якщо значення температур  $\Delta t'$  і  $\Delta t''$  відрізняються менш ніж в 2 рази, то можна використовувати середнє арифметичне значення

$$\bar{\Delta t} = \frac{\Delta t' + \Delta t''}{2}.$$

Протиточна схема руху теплоносіїв в більшості випадків є більш ефективною.

За повірного розрахунку значення теплового потоку визначається по формулі

$$Q = \frac{t'_{c1} - t'_{c2}}{\frac{1}{kF} + \frac{1}{2G_1 C_{p1}} + \frac{1}{2G_2 C_{p2}}},$$

після чого розраховують кінцеві температури теплоносіїв.

### Завдання 6

**Дано:** двотрубний протиточний теплообмінник, призначений для рідкого холодильного агента після конденсатору. Діаметр внутрішніх труб  $d$  і зовнішніх  $D$ .

У теплообміннику потрібно охолодити  $m$  кг/с холодильного агента від температури насичення  $t_n = t_{x1}$  до температури  $t_{x2}$ . Температура води, що охолоджує, на вході в апарат  $t_{в1}$ , на виході з нього  $t_{в2}$ . Вода рухається по внутрішніх трубах; холодильний агент охолоджується в просторі між трубами. Визначити поверхню теплообмінника, а також довжину і число труб, що створюють вибрану принципову конструкцію апарату. Зобразити схему теплообмінного апарату.

**Вказівки:** прийняти теплопровідність сталі  $\lambda_{ст} = 45$  Вт/(м·К), міді  $\lambda_{м} = 384$  Вт/(м·К). Розрахунок здійснити для чистої поверхні і за

наявності забруднень у вигляді шару масла (з боку агента)  $\delta_{\text{мас}} = 0,05$  мм, ( $\lambda_{\text{мас}} = 0,139$  Вт/(м·К)) і шару водяного каменя (з боку води)  $\delta_{\text{кам}} = 0,5$  мм ( $\lambda_{\text{кам}} = 1,745$  (Вт/м·К)).

Таблиця №6

Перед остан. цифра шифру	Холод-агент	Внутрішні труби, $d \times \delta$ , мм	Зовнішні труби $D \times \delta$ , мм	Матеріал труб	Остання цифра шифру	Втрата холода, $m$ , кг/с	Температура, °С			
							Холодагента		Води	
							На вході, $t_{e1}$	На виході, $t_{e2}$	На вході, $t_{e1}$	На виході, $t_{e2}$
0	Аміак	20×3,5	40×3	Сталь	0	0,120	32,5	23	20	26
1	Фреон 12	10×1	38×1,5	Мідь	1	0,090	25,0	17	14	20
2	Фреон 22	15×3	28×3	Сталь	2	0,121	35,0	27	25	29
3	Аміак	28×3,5	47×3	Сталь	3	0,133	30,5	21	18	24
4	Фреон 12	12×1	25×1,5	Мідь	4	0,105	34,8	26	24	28
5	Фреон 22	18×1,5	30×1,5	Мідь	5	0,128	35,0	19	16	22
6	Аміак	23×3	38×3,5	Сталь	6	0,110	40,0	30	28	32
7	Фреон 12	14×1,5	25×1,5	Мідь	7	0,132	30,0	24	22	26
8	Фреон 22	20×3,5	40×3	Сталь	8	0,098	37,8	29	26	32
9	Аміак	38×3,5	57×3	Сталь	9	0,152	35,6	27	25	29

### Приклад розв'язання завдання 6

**Дано:** Конденсат холодильного агента аміаку охолоджується в двотрубному протиточному теплообміннику води. Труби сталеві. Внутрішні труби завтовшки 3,5 мм, мають зовнішній діаметр 38 мм, зовнішні труби завтовшки 3 мм, мають зовнішній діаметр 57 мм. Втрата аміаку – 0,152 кг/с. Температура аміаку на вході 35,6°С на виході 27°С, води – відповідно 25°С і 29°С. Визначити поверхню теплообмінника, а також довжину і число труб, що створюють вибрану принципову конструкцію апарату. Зобразити схему теплообмінного апарату. Прийняти теплопровідність сталі  $\lambda_{\text{ст}} = 45$  Вт/(м·К), міді  $\lambda_{\text{м}} = 384$  Вт/(м·К). Розрахунок здійснити для чистої поверхні і за наявності забруднень у вигляді шару масла (з боку агента)  $\delta_{\text{мас}} = 0,05$  мм, ( $\lambda_{\text{мас}} = 0,139$  Вт/(м·К)) і шару водяного каменя (з боку води)  $\delta_{\text{кам}} = 0,5$  мм ( $\lambda_{\text{кам}} = 1,745$  (Вт/м·К)).

### Рішення

Середня логарифмічна різниця температур (середній температурний) в теплообміннику становить:

$$\Delta t_{\dot{n}d} = \frac{(t_{x1} - t_{\dot{a}2}) - (t_{x2} - t_{\dot{a}1})}{\ln \frac{(t_{\dot{a}1} - t_{\dot{a}2})}{(t_{\dot{\delta}2} - t_{\dot{a}1})}} = \frac{(35,6 - 29) - (27 - 25)}{\ln \frac{(35,6 - 29)}{(27 - 25)}} = 3,9(^{\circ}\dot{N}).$$

Середня температура теплоносіїв в теплообмінному апараті: а) води

$$t_{\dot{a}} = \frac{t_{\dot{a}1} + t_{\dot{a}2}}{2} = \frac{25 + 29}{2} = 27(^{\circ}\dot{N}).$$

б) холодильного агенту

$$t_{\dot{\delta}} = t_{\dot{a}} + \Delta t_{\dot{n}d} = 27 + 3,9 = 30,9(^{\circ}\dot{N}).$$

Середня температура стінки трубки, що розділяє теплоносії:

$$t_{\dot{n}\dot{n}} = \frac{t_{\dot{a}} + t_{\dot{\delta}}}{2} = \frac{27 + 30,9}{2} = 29(^{\circ}\dot{N}).$$

Теплофізичні характеристики теплоносіїв при середній температурі визначаємо методом інтерполяції (Додаток, табл. 5 – 9):

а) води при  $t_e = 27^{\circ}\text{C}$ : густина –  $\rho_e = 996,4 \text{ кг/м}^3$ ; теплоємність –  $C_B = 4,17 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ; кінематична в'язкість –  $\nu_B = 0,865 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; теплопровідність –  $\lambda_B = 0,601 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ ; критерій Прандтля води –  $\text{Pr}_B = 5,98$ ; сталі (при  $t = 29^{\circ}\text{C}$ )  $\text{Pr}_{\text{ст}} = 5,6$ .

б) аміаку при  $t_x = 30,9^{\circ}\text{C}$ : густина –  $\rho_x = 593,7 \text{ кг/м}^3$ ; теплоємність –  $C_x = 4,81 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ ; кінематична в'язкість –  $\nu_x = 0,228 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; теплопровідність –  $\lambda_x = 0,706 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ ; критерій Прандтля аміаку –  $\text{Pr}_x = 1,38$ ; сталі (при  $t = 22^{\circ}\text{C}$ ) –  $\text{Pr}_{\text{ст}} = 1,39$ .

Теплове навантаження на апарат:

$$Q_{\dot{\delta}} = m_{\dot{\delta}} \cdot C_{\dot{\delta}}(t_{\dot{\delta}1} - t_{\dot{\delta}2}) = 0,152 \cdot 4,81 \cdot (35,6 - 27) = 6,29 (\text{к}\dot{\text{A}}\dot{\text{н}}).$$

Втрата води в теплообміннику:

$$m_{\dot{a}} = \frac{Q}{C_{\dot{a}} \cdot (t_{\dot{a}2} - t_{\dot{a}1})} = \frac{6,29}{4,17 \cdot (29 - 25)} = 0,377 \left( \frac{\text{к}\dot{\text{A}}}{\dot{\text{н}}} \right).$$

Швидкість води в апараті:

$$\omega_{\dot{a}} = \frac{4 \cdot m_{\dot{a}}}{\rho_{\dot{a}} \cdot \pi \cdot d_{\dot{a}i}^2} = \frac{4 \cdot 0,377}{996,4 \cdot 3,14 \cdot 0,031^2} = 0,5 \left( \frac{\text{м}}{\dot{\text{н}}} \right).$$

Число Рейнольдса для води:

$$\text{Re}_{\dot{a}} = \frac{\omega_{\dot{a}} \cdot d_{\dot{a}i}}{\nu_{\dot{a}}} = \frac{0,5 \cdot 0,031}{0,865 \cdot 10^{-6}} = 17919 \geq 10000,$$

тому для води характерний розвинений турбулентний рух, при якому критерійне рівняння має вигляд:

$$Nu_{\epsilon} = 0,021 Re_{\epsilon}^{0,8} \cdot Pr_{\epsilon}^{0,43} \left( \frac{Pr_{\epsilon}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} =$$

$$0,021 \cdot 17919^{0,8} \cdot 5,98^{0,43} \cdot \left( \frac{5,98}{5,6} \right)^{0,25} = 115.$$

Коефіцієнт тепловіддачі з боку рідкого розчину:

$$\alpha_{\hat{a}} = \frac{Nu_{\hat{a}} \cdot \lambda_{\hat{a}}}{d_{\hat{a}i}} = \frac{115 \cdot 0,601}{0,031} = 2230 \left( \frac{\hat{A}\hat{n}}{\epsilon^2 \cdot E} \right).$$

Швидкість рідкого холодильного агента в апараті:

$$\omega_{\hat{g}} = \frac{4m_x}{\pi \rho_x \cdot (D_{\hat{a}i}^2 - d_{\hat{c}i\hat{a}}^2)} = \frac{4 \cdot 0,152}{3,14 \cdot 593,7 \cdot (0,051^2 - 0,038^2)} = 0,282.$$

$$d_{\hat{y}\hat{e}\hat{a}} = D_{\hat{a}i} - d_{\hat{i}r\hat{d}} = 0,051 - 0,038 = 0,013 (\epsilon).$$

Число Рейнольдса для холодильного агента:

$$Re_x = \frac{\omega_x \cdot d_{\hat{y}\hat{e}\hat{a}}}{\nu_x} = \frac{0,282 \cdot 0,013}{0,228 \cdot 10^{-6}} = 16080 \geq 10\,000,$$

тому для рідкого аміаку в апараті характерний розвинений турбулентний рух, при якому критерійне рівняння має вигляд

$$Nu_x = 0,021 Re_x^{0,8} \cdot Pr_x^{0,43} \left( \frac{Pr_x}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} =$$

$$0,021 \cdot 16080^{0,8} \cdot 1,38^{0,43} \cdot \left( \frac{1,38}{1,39} \right)^{0,25} = 55,9.$$

$$\alpha_x = \frac{Nu_x \cdot \lambda_x}{d_{\hat{e}k\hat{e}}} = \frac{55,9 \cdot 0,47}{0,013} = 2022 \left( \frac{Bm}{M^2 \cdot K} \right).$$

Коефіцієнт теплопередачі, віднесений до внутрішньої поверхні труби, омиваною водою: а) чистою

$$K_{\text{ч}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\epsilon}} + \frac{\delta_{mp}}{\lambda_{mp}} \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{сер}}} + \frac{1}{\alpha_x} \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{зов}}}} =$$

$$\frac{1}{\frac{1}{2230} + \frac{0,0035}{45} \cdot \frac{31}{34,5} + \frac{1}{2022} \cdot \frac{31}{38}} = 1031 \left( \frac{Bm}{M^2 \cdot K} \right).$$

б) забрудненою

$$K_3 = \frac{1}{\frac{1}{K_ч} + \frac{\delta_{кам}}{\lambda_{кам}} + \frac{\delta_{мас}}{\lambda_{мас}}} = \frac{1}{\frac{1}{1031} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{1,745} + \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{0,139}} = 588 \left( \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \right).$$

Поверхня теплопередачі апарату:

а) чиста

$$F_ч = \frac{Q}{K_ч \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{6290}{1031 \cdot 3,9} = 1,56 (м^2).$$

б) забруднена

$$F_3 = \frac{Q}{K_3 \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{6290}{588 \cdot 3,9} = 2,74 (м^2).$$

Загальна довжина труб:

а) без забруднень

$$L_ч = \frac{F_ч}{\pi \cdot d_{вн}} = \frac{1,56}{3,14 \cdot 0,031} = 16,0 (м).$$

б) з забрудненнями

$$L_3 = \frac{F_3}{\pi \cdot d_{вн}} = \frac{2,74}{3,14 \cdot 0,031} = 28,1 (м).$$

Приймаємо довжину однієї труби  $l = 2,5$  м і знаходимо загальну кількість труб:

а) без забруднень

$$n_ч = \frac{L_ч}{l} = \frac{16}{2,5} = 7 \text{ труб.}$$

б) з забрудненнями

$$n_3 = \frac{L_3}{l} = \frac{28,1}{2,5} = 12 \text{ труб.}$$

## 7. Розрахунок теплообмінних апаратів при охолодженні.

### Теоретичні відомості

При русі рідини по трубах важливе значення має характер цього руху, який залежить як від теплофізичних властивостей рідини, так і від геометрії трубопроводу.

*Ламінарний* – режим руху рідини, при якому поперек потоку теплота передається за рахунок руху молекул.

*Турбулентний* – режим руху рідини, при якому поперек потоку теплота передається за рахунок руху макрочастинок.

*Подібні* – процеси теплообміну, що мають подібні поля швидкості і температури.

Умови подібності фізичних процесів:

1. Подібні процеси мають однакову фізичну природу і протікають за однаковими законами.
2. Подібні процеси мають місце в геометрично подібних системах.
3. Поля фізичних величин мають бути задані на своїх границях подібним чином.
4. Для подібних процесів мають бути рівними однойменні критерії подібності.

*Число подібності* – кількісна характеристика співвідношень між різними діючими в процесі факторами.

*Критерій подібності* – число подібності, складене тільки з заданих параметрів математичного виразу процесу.

Основні числа подібності:

**Число Рейнольдса** – відображає співвідношення сил інерції і сил в'язкості в потоці рідини

$$Re = \frac{\rho v_0 l_0}{\mu}$$

При значеннях числа Рейнольдса  $Re < 2320$  місце ламінарний режим руху рідини, при  $Re < 10000$  має місце турбулентний режим, при проміжних числах Рейнольдса має місце нестійкий перехідний режим руху рідини, хоча розподіл за числами є умовним.

**Число Пекле** – відображає співвідношення між тепловими потоками конвекції і теплопровідності

$$De = \frac{\rho v_0 \dot{m} d l_0}{\lambda}$$

**Число Прандтля** – відображає співвідношення між променевим теплообміном і конвективним тепловим потоком

$$Pr = \frac{\mu \dot{m} d}{\lambda}$$

Число Прандтля є критерієм подібності. Для повітря  $Pr \approx 0,7$ , для масел досягає великих значень при низьких температурах, у рідких металів  $Pr$  дуже мале через високу теплопровідність.

**Число Нуссельта** – являє собою безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі

$$Nu = \frac{\alpha r_0}{\lambda}$$

**Число Ейлера** – відображає співвідношення між силами тиску і силами інерції

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v_0^2},$$

де  $\Delta p$  – втрата тиску в трубі,  $v_0$  – середня швидкість.

**Число Грасгофа** – відображає співвідношення між підйомною силою і силою в'язкого тертя

$$Gr = \frac{g \beta \Delta t \rho^2 l^3}{\mu^2},$$

де  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення,  $l$  – визначаючий розмір.

*Підйомна сила* – різниця між силою тяжіння і силою Архімеда.  $Gr$  використовується для описання вільного руху рідини в гравітаційному полі внаслідок нерівномірного нагріву.

### Завдання 7

**Дано:** Шорсткотрубна батарея розсолу є двоярядним змійовиком горизонтальних, сполучених калачами сталевих труб ( $\lambda_{ст} = 45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) діаметром  $d$  і товщиною  $\delta$ . Відстань між трубами і між рядами  $S$ . Батарея призначена для охолодження камери схову харчових продуктів. Температура повітря в камері  $t_{нов}$ , відносна вологість  $\phi$ . Розсіл – водний розчин солі. Швидкість руху розсолу  $0,1 \text{ м/с}$ , температура на вході в батарею  $t_{p1}$ , при виході з неї –  $t_{p2}$ .

**Визначити** коефіцієнт теплопередачі і поверхню охолодження батареї для чистої поверхні труб і для випадку, коли на зовнішній поверхні труб утворюється снігова шуба товщиною  $\delta_{сн} = 6 \text{ мм}$  ( $\lambda_{сн} = 0,232 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ).

Для надійної роботи батареї розсолу температура замерзання розчину повинна бути на  $3 - 5^\circ\text{С}$ нижча за температуру розсолу, що поступає в батарею ( $t_{p1}$ ).



Таблиця №7

Перед-остання цифра шифру	Діаметр труби $d \times \delta$ , мм	Відстань між трубами $S$ , мм	Остання цифра шифру	Параметри повітря камери		Розчин солі	Температура розчину, °С	
				$t_{нов}$ , °С	$\phi$ , %		На вході $t_{p1}$	На виході $t_{p2}$
0	30×2,5	150	0	0	80	NaCl	-12	-8
1	40×2,5	140	1	-2	85	CaCl <sub>2</sub>	-13	-11
2	50×3,0	170	2	2	80	NaCl	-8	-6
3	57×3,0	160	3	-10	95	CaCl <sub>2</sub>	-20	-18
4	46×3,0	150	4	-15	98	CaCl <sub>2</sub>	-26	-23
5	35×2,5	150	5	-1	85	CaCl <sub>2</sub>	-12	-9
6	48×3,0	160	6	-12	96	CaCl <sub>2</sub>	-25	-22
7	52×3,0	170	7	1	80	NaCl	-10	-8
8	42×2,5	160	8	2	80	NaCl	-9	-6
9	57×3,0	170	9	0	80	NaCl	-11	-9

### Приклад розв'язання завдання 7.

**Дано:** Шорсткотрубна батарея розсолу є двоярядним змійовиком горизонтальних, сполучених калачами сталевих труб ( $\lambda_{ст} = 45 \text{ Вт/(м·К)}$ ) діаметром  $d = 57 \text{ мм}$  і товщиною  $\delta = 3 \text{ мм}$ . Відстань між трубами і між рядами  $S$ . Батарея призначена для охолодження камери схову харчових продуктів. Температура повітря в камері  $t_{нов} = 0^\circ\text{C}$ , відносна вологість  $\phi = 80\%$ . Розсіл – хлорид натрію NaCl. Швидкість руху розсолу  $0,1 \text{ м/с}$ , температура на вході в батарею  $t_{p1} = -13^\circ\text{C}$ , при виході з неї –  $t_{p2} = -7^\circ\text{C}$ . Визначити коефіцієнт теплопередачі і поверхню охолодження батареї для чистої поверхні труб і для випадку, коли на зовнішній поверхні труб утворюється снігова шуба товщиною  $\delta_{сн} = 6 \text{ мм}$  ( $\lambda_{сн} = 0,232 \text{ Вт/(м·К)}$ ).

### Рішення

Теплофізичні властивості розчину NaCl беремо з табл. 12

Додатку:

- Найбільш близька температура замерзання –  $15,1^\circ\text{C}$ , що відповідає концентрації  $18,8\%$ .
- Фізичні характеристики розсолу приймаємо при середній температурі

$$t_{\text{нід}} = \frac{t_{d1} + t_{d2}}{2} = \frac{-13 - 7}{2} = -10 (^{\circ}\text{N}).$$

Густина  $\rho_p = 1148 \text{ кг/м}^3$  (табл. 10 Додатку), коефіцієнт об'ємного розширення  $\beta_p = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$  (табл. 11 Додатку), теплоємність  $C_p = 3,439 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ , кінематична в'язкість  $\nu_p = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , теплопровідність  $\lambda_p = 0,533 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , критерій Прандтля  $Pr_p = 24,8$ .

Внутрішній діаметр труби

$$d_{\text{ді}} = d - 2\delta = 57 - 2 \cdot 3 = 51 (\text{мм}) = 0,051 (\text{м}).$$

Для того, щоб встановити режим руху розсолу, знаходимо критерій Рейнольдса:

$$Re_p = \frac{\omega_p \cdot d_{\text{ді}}}{\nu_p} = \frac{0,1 \cdot 0,051}{3,4 \cdot 10^{-6}} = 1500 \leq 2320.$$

Режим руху розсолу – ламінарний.

При ламінарному русі розсолу критерійне рівняння має вигляд:

$$Nu_d = 0,15 Re_d^{0,33} \cdot Pr_d^{0,43} \cdot Gr_p^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr_p}{Pr_{\text{сн}}} \right)^{0,25}.$$

Приймаємо температури стінки труби з боку розсолу і з боку повітря однаковими  $t_{\text{ст}} = -9,5^{\circ}\text{C}$ . При цьому

$$\left( \frac{Dr_p}{Dr_{\text{сн}}} \right)^{0,25} \approx 1.$$

Обчислюємо критерій Грасгофа для розчину:

$$Gr_d = \frac{g \cdot d_{\text{ді}}^3 \cdot \beta_p \cdot (t_{\text{сн}} - t_p)}{\nu_d^2} = \frac{9,81 \cdot 0,051^3 \cdot 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5}{3,4^2 \cdot 10^{-12}} = 17440.$$

Обчислюємо критерій Нуссельта для розчину:

$$Nu_d = 0,15 Re_d^{0,33} \cdot Dr_d^{0,43} \cdot Gr_p^{0,1} = 0,15 \cdot 1500^{0,33} \cdot 24,8^{0,43} \cdot (17440)^{0,1} = 17,7.$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі розсолу.

$$\alpha_d = \frac{Nu_p \cdot \lambda_p}{d_{\text{ді}}} = \frac{17,7 \cdot 0,533}{0,051} = 185 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right).$$

Прийmemo ступінь чорноти поверхні труб  $\varepsilon_1 = 0,92$ , і ступінь чорноти стін камер, що виштукатурені  $\varepsilon_2 = 0,91$ . Коефіцієнт променистого обміну

$$\varepsilon_{d\text{д}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,92} + \frac{1}{0,91} - 1} = 0,84.$$

При  $S/d < 4$  коефіцієнт опроміненості для двоядних батарей дорівнює  $\psi = 0,72$ .

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря:

$$\alpha_{\bar{e}} = \frac{\psi \cdot \varepsilon_{d\bar{d}} \cdot C_0 [(T_{d\bar{r}\bar{a}})^4 - (\dot{N}_{\bar{n}\bar{n}})^4]}{t_{d\bar{r}\bar{a}} - t_{\bar{n}\bar{n}}} = \frac{0,72 \cdot 0,84 \cdot 5,67 \cdot 10^{-4} \cdot [(273)^4 - (263,5)^4]}{0 + 9,5} = 2,93 \left( \frac{\dot{A}\bar{n}}{\check{e}^2 \cdot E} \right),$$

де  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-4}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) - стала Стефана-Больцмана.

Вміст вологи в повітрі камери і на поверхні батарей  $d$  і  $d''$  визначемо за допомогою діаграми вологого повітря (рис. 8.1)

$$d = 3,4 \text{ г/кг при } t_{\text{в}} = 0^\circ\text{C і } \varphi = 80\%;$$

$$d'' = 1,8 \text{ г/кг при } t_{\text{ст}} = -9,5^\circ\text{C і } \varphi = 100\%.$$

Коефіцієнт вологовипадіння визначається:

$$\zeta = 1 + 2880 \frac{d - d''}{t_{d\bar{r}\bar{a}} - t_{\bar{n}\bar{n}}} = 1 + 2880 \cdot \frac{(3,4 - 1,8) \cdot 10^{-3}}{0 + 9,5} = 1,49.$$

Фізичні властивості повітря при  $t_{\text{нов}} = 0^\circ\text{C}$  (табл. 5 Додатку): теплопровідність  $\lambda_{\text{нов}} = 2,44 \cdot 10^{-2}$  (Вт/м·К), кінематична в'язкість  $\nu_{\text{нов}} = 13,28 \cdot 10^{-6}$  (м<sup>2</sup>/с). Знаходимо критерії Грасгофа і Нуссельта для повітря:

$$Gr_{d\bar{r}\bar{a}} = \frac{q \cdot d_{\check{c}\bar{r}\bar{a}}^3 \cdot (t_{d\bar{r}\bar{a}} - t_{\bar{n}\bar{n}})}{T_{d\bar{r}\bar{a}} \cdot \nu_{d\bar{r}\bar{a}}^2} = \frac{9,81 \cdot 0,057^3 \cdot (0 + 9,5)}{273 \cdot 13,28^2 \cdot 10^{-12}} = 3,59 \cdot 10^5.$$

$$Nu_{d\bar{r}\bar{a}} = 0,47 \cdot Gr_{d\bar{r}\bar{a}}^{0,25} = 0,47 \cdot (3,59 \cdot 10^5)^{0,25} = 11.$$

Коефіцієнт конвективного теплообміну знаходимо з критерійного рівняння для вільного руху в горизонтальній трубі:

$$\alpha_{\bar{e}} = \frac{Nu_{d\bar{r}\bar{a}} \cdot \lambda_{d\bar{r}\bar{a}}}{d_{\check{c}\bar{r}\bar{a}}} = \frac{11 \cdot 2,44 \cdot 10^{-2}}{0,057} = 4,7 \left( \frac{\dot{A}\bar{n}}{\check{e}^2 \cdot E} \right).$$

Загальний коефіцієнт віддачі з боку повітря

$$\alpha_{d\bar{r}\bar{a}} = \alpha_{\bar{e}} + \alpha_{\bar{e}} \cdot \zeta = 2,93 + 4,7 \cdot 1,49 = 9,95 \left( \frac{\dot{A}\bar{n}}{\check{e}^2 \cdot E} \right).$$

Коефіцієнт теплопередачі для чистої поверхні труб:

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_d} + \frac{\delta}{\lambda_{\bar{n}\bar{n}}} + \frac{1}{\alpha_{d\bar{r}\bar{a}}}} = \frac{1}{\frac{1}{185} + \frac{0,003}{45} + \frac{1}{9,95}} = 9,40 \left( \frac{\dot{A}\bar{n}}{\check{e}^2 \cdot E} \right).$$

Витрата розсолу

$$m_p = \frac{2\pi \cdot d^2}{4} \cdot \omega_p \rho_p = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,051^2}{4} \cdot 0,1 \cdot 1148 = 0,47 \left( \frac{\check{e}\bar{a}}{\bar{n}} \right).$$

Теплове навантаження на батарею:

$$Q = m_d \cdot C_d(t_{d2} - t_{d1}) = 0,47 \cdot 3,439 \cdot 10^3 \cdot (-7 + 13) = 9697(\text{Ан}).$$

Визначаємо площу поверхні батареї для чистої поверхні труб:

$$F = \frac{Q}{K \cdot (t_a - t_d)} = \frac{9697}{9,40 \cdot (0 + 10)} = 103,2(\text{є}^2).$$

Коефіцієнт теплопередачі за наявності снігової шуби:

$$E_{ni} = \frac{1}{\frac{1}{E} + \frac{\delta_{ni}}{\lambda_{ni}}} = \frac{1}{\frac{1}{9,40} + \frac{0,006}{0,232}} = 7,56 \left( \frac{\text{Ан}}{\text{є}^2 \cdot E} \right).$$

Знаходимо площу поверхні батареї за наявності на трубах снігової шуби:

$$F = \frac{Q}{K \cdot (t_a - t_d)} = \frac{9697}{7,56 \cdot (0 + 10)} = 128,3(\text{є}^2).$$

## 8. Параметри вологого повітря

### Теоретичні відомості

Атмосферне повітря використовується для сушки матеріалів в сушильних установках, охолодження води, що циркулює, на теплових електростанціях, в установках кондиціонування, інших важливих технологічних процесах.

*Вологе повітря* – механічна суміш сухого повітря і водяної пари. На практиці використовується при тиску, близькому до атмосферного, тому для нього є справедливими закони ідеальних газів.

Згідно закону Дальтона

$$d = d_{d'ia} + d_{d'}$$

*Тиск насичення*  $p_n$  – максимальний тиск вологого повітря за даної температури.

Якщо за даної температури парціальний тиск пари менше, ніж тиск насичення

$$d_{d'} < d_i,$$

то пар в суміші буде в перегрітому стані (точка 2 на рис. 9).

*Ненасичене вологе повітря* – суміш сухого повітря і перегрітої водяної пари.

Якщо за даної температури парціальний тиск пари дорівнює тиску насичення

$$d_{d'} = d_i,$$

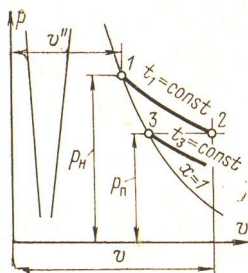


Рис. 9. Стан водяної пари в вологому повітрі.

насичена пара (точка 1).

*Насичене вологе повітря* – суміш сухого повітря і сухої насиченої пари. Охолоджуючи ненасичене вологе повітря можна перевести його в насичений стан при  $p = const$ .

*Температура точки роси*  $t_p$  – температура, за якої вологе повітря стає насиченим.

*Абсолютна вологість* – кількість водяної пари в кілограмах в  $1 \text{ м}^3$  вологого повітря. Вона дорівнює густині пари за його парціального тиску і температурі суміші

$$\rho_{d'} = \frac{D_{d'}}{R_n T}$$

Найбільша густина у насиченого вологого повітря за тієї ж температури.

*Відносна вологість* – відношення дійсної абсолютної вологості повітря до абсолютної вологості насиченого повітря за даної температури

$$\varphi = \frac{\rho_d}{\rho_i} = \frac{d_d}{d_i}$$

Відносна вологість вимірюється психрометром.

*Вологовміст* – відношення маси водяної пари в суміші до маси сухого повітря

$$d = \frac{m_d}{m_a} = \frac{\rho_d}{\rho_a} = \frac{\mu_d \rho_d}{\mu_a \rho_a}$$

*Ентальпія* вологого повітря визначається як ентальпія суміші, що складається з 1 кг повітря і  $d$  кг водяної пари

$$I = i_a + di_n$$

*Молекулярна маса* вологого повітря визначається по формулі

$$\mu = \mu_a r_a + \mu_n r_n = 28,95 - 10,93 \frac{p_i}{d}$$

Вологе повітря легше сухого повітря за однакових тиску і температури. Газова постійна для вологого повітря

$$R = \frac{8314}{28,95 - 10,93 \frac{p_i}{d}}$$

### Завдання 8

**Дано:** Визначити витрату теплоти (кількість теплоти, яка витрачається на видалення 1 кг вологи) при сушці в теоретичній сушарці за температури зовнішнього повітря  $t_{зов}$ , відносної вологіст  $\varphi_a$ , температури повітря після калорифера  $t_k$  (узяти з таблиці № 8).

В процесі сушки (адіабатного насичення повітря водяними парами при  $h = \text{const}$ ) температура вологого повітря зменшується на  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ .

Атмосферний тиск – 745 мм рт. ст.

Параметри повітря  $t_{зов}$  і відносну вологість  $\varphi_a$  вибрати по передостанній цифрі залікової книжки, параметри повітря після калорифера  $t_k$  – по останній цифрі. Завдання за допомогою  $h$ - $d$  діаграми і привести схему я на ній.

Таблиця №8

	Варіанти									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Передостання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура навколишнього повітря $t_{зов}, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	20	10	15	20	25
Відносна вологість $\varphi_a, \%$	5	10	15	20	25	30	25	20	15	10
Остання цифра шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура повітря після калориферу $t_k, ^\circ\text{C}$	40	45	50	55	60	40	45	50	55	60

### Методика розв'язання завдання 8

Визначити витрату теплоти (кількість теплоти, яка витрачається на видалення 1 кг води) при сушці в теоретичній сушарці за температури зовнішнього повітря  $t_{зов} = 25^\circ\text{C}$ , відносної вологості  $\varphi_a = 40\%$ , і температури повітря після калорифера  $t_k = 70^\circ\text{C}$ .

В процесі сушки (адіабатного насичення повітря водяними парами при  $h = \text{const}$ ) температура вологого повітря зменшується на  $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ .

Атмосферний тиск – 745 мм. рт. ст.

### Рішення

Знаходимо початковий стан повітря по  $h$ - $d$  діаграмі на перетині ізотерми  $t_{зов} = 25^\circ\text{C}$  і відносної вологості  $\varphi_a = 40\%$  (. Для цієї точки вологість дорівнює  $d_a = 13,4$  (г вологого повітря на кг сухого повітря), а ентальпія  $h = 46$  кДж/кг.

Стан повітря після підігріву визначається точкою на перетині  $d_l = \text{const}$  і  $t_k = 70^\circ\text{C}$ . З цієї точки проводимо лінію  $h_k = \text{const}$  до перетину з  $t_c = 65^\circ\text{C}$ , де визначаємо точку, яка характеризує стан повітря після сушарки. Для цієї точки:  $d_c = 15$  (г вологого повітря на кг сухого повітря), а ентальпія  $h_c = 64$  кДж/кг сухого повітря.

Таким чином, на 1 кг сухого повітря випаровується води:

$$\Delta d = d_c - d_a = 15 - 13,4 = 1,6 \left( \frac{\text{г}}{\text{кг}} \right).$$

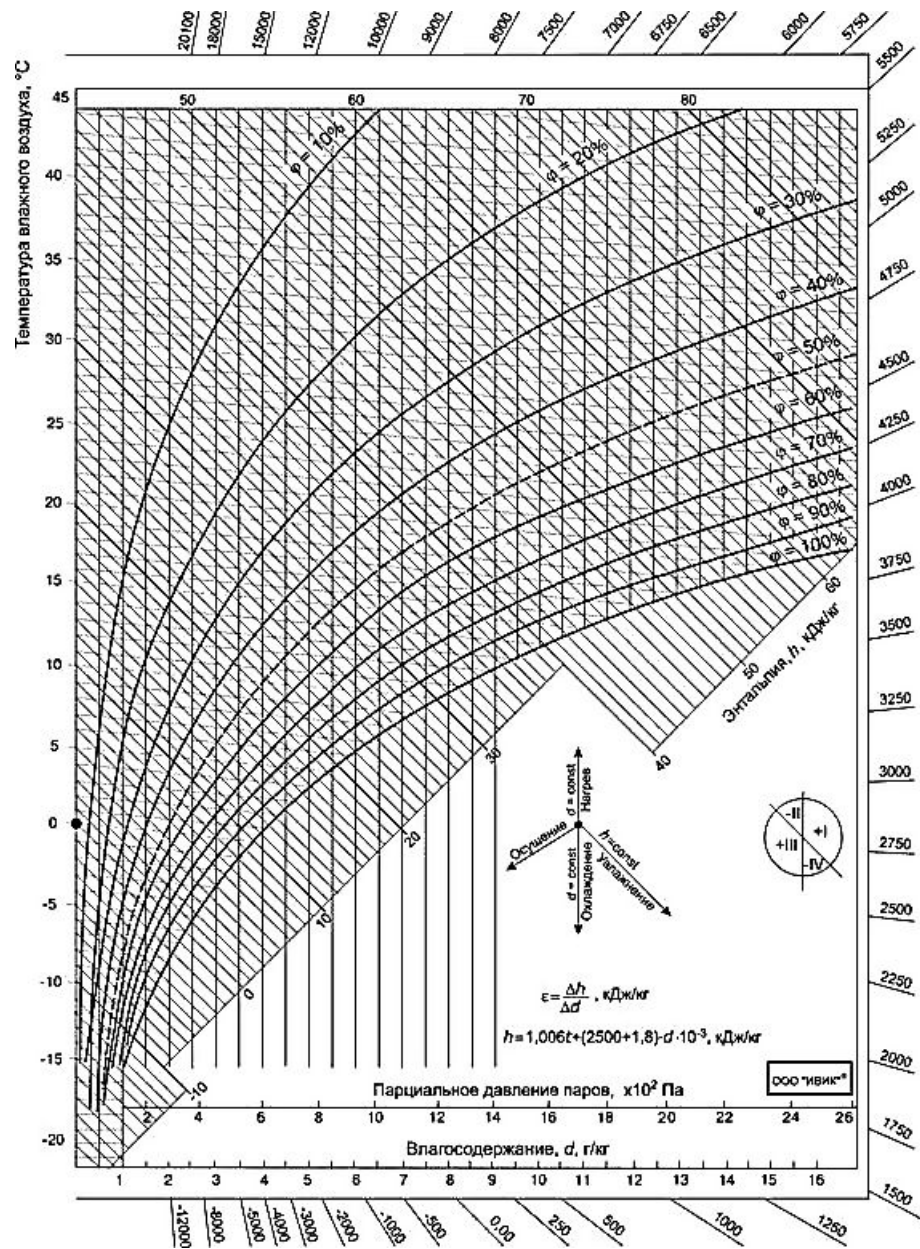


Рис. 10. h-d – диаграмма влажного воздуха для  $P_{atm} = 745$  мм.рт.ст.



Для випаровування 1 кг (1000г) вологи необхідно

$$m = \frac{1000}{1,6} = 625 \text{ (кг)}$$

сухого повітря.

Витрати теплоти в калорифері на 1 кг сухого повітря:

$$q = h - h_c = 64 - 46 = 18 \left( \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right).$$

Витрати теплоти на випаровування:

$$Q = qm = 18 \cdot 625 = 11250 \text{ (кДж)}.$$

### Додатки

Таблиця 1. Молекулярні маси деяких газів

Газ	Хімічне позначення	Молекулярна маса кг\кмоль
Повітря	-	28,97
Гелій	He	4,0026
Аргон	Ar	39,944
Водень	H <sub>2</sub>	2,0159
Азот	N <sub>2</sub>	28,0134
Кисень	O <sub>2</sub>	31,9968
Окисел вуглецю	CO	28,009
Двоокис вуглецю	CO <sub>2</sub>	44,0079
Сірчистий газ	SO <sub>2</sub>	64,0658
Аміак	NH <sub>3</sub>	17,0306
Водяна пара	H <sub>2</sub> O	18,014

Таблиця 2. Молярні теплосмності газів

Гази	$\frac{\mu C_{V, \text{г}}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\mu C_{p, \text{г}}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$k = \frac{\mu C_p}{\mu C_V}$
Одноатомні	12,5	20,8	1,664
Двоатомні	20,8	29,1	1,399
Трьох- і багатоатомні	29,1	37,4	1,285

Таблиця 3. Середня мольна теплоємність газів при  $P = \text{const}$   $\mu C_p$ ,  
кДж/(кмоль·К)

t, °C	C <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Повітря
0	29,2783	29,0228	28,6208	29,1275	35,8650	38,8590	33,5033	29,0773
100	29,5421	29,0521	28,9391	29,1819	38,1179	40,6596	33,7462	29,1568
200	29,9357	29,1359	29,0773	29,3076	40,0650	42,3346	34,1231	29,3034
300	30,4047	29,2908	29,1275	29,5211	41,7609	43,8839	34,5795	29,5253
400	30,8820	29,5044	29,1903	29,7933	43,2558	45,2239	35,0945	29,7933
500	31,3385	29,7682	29,2531	30,1032	44,5790	46,3963	35,6347	30,0990
600	31,7656	30,0487	29,3201	30,4298	45,7599	47,3594	36,2000	30,4088
700	32,1550	30,3460	29,4122	30,7564	46,8193	48,2388	36,7946	30,7271
800	32,5067	30,6392	29,5211	31,0746	47,7698	48,9507	37,3976	31,0328
900	32,8292	30,9281	29,6509	31,3803	48,6240	49,6206	38,0132	31,3259
1000	33,1223	31,2003	29,7933	31,6693	49,3987	50,1650	38,6245	31,6023
1100	33,3903	31,4599	29,9482	31,9414	50,1064	50,6675	39,2317	31,8661
1200	33,6373	31,7111	30,1115	32,1969	50,7471	50,0862	39,8305	32,1131
1300	33,8676	31,9456	30,2916	32,4314	51,3291	-	40,4125	32,3476

Таблиця 4. Коефіцієнт зниження теплообміну на нижніх рядах  
горизонтальних труб при конденсації.

Розташування пучка труб	Кількість рядів по вертикалі												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
коридорне	1	0,86	0,72	0,62	0,53	0,46	0,4	0,36	0,34	0,32	0,31	0,3	0,29
шахове	1	0,98	0,90	0,82	0,75	0,68	0,61	0,56	0,52	0,49	0,47	0,45	0,43

Таблиця 5. Фізичні властивості сухого повітря при  $P_{\text{нов}} = 760$  мм. рт. ст.

t, °C	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_{\text{ср}}$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^{-2}$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
-30	1,453	1,013	2,20	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	11,61	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	16,00	0,701

Таблиця 6. Фізичні властивості води на лінії насичення.

t, °C	p, бар	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	r, МДж/кг	C <sub>ср</sub> , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^{-4}$ , 1/К	Pr
10	0,0123	999,7	0,94	2,48	4,19	0,580	1,306	0,70	9,45
20	0,0234	998,2	1,73	2,45	4,18	0,579	1,006	1,82	7,03
30	0,0424	995,7	3,04	2,43	4,17	0,612	0,805	3,21	5,45
40	0,0738	992,2	5,12	2,41	4,17	0,627	0,659	3,87	4,36
50	0,1234	988,1	8,31	2,38	4,17	0,640	0,556	4,49	3,59
60	0,1992	983,1	13,02	2,36	4,18	0,650	0,478	5,11	3,03
70	0,3117	977,8	19,82	2,33	4,19	0,662	0,415	5,70	2,58

Таблиця 7. Фізичні властивості аміаку (рідина) на лінії насичення.

t, °C	p, бар	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	r, МДж/кг	C <sub>ср</sub> , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^{-4}$ , 1/К	Pr
10	6,150	624,7	1,23	4,647	0,509	0,270	22,5	1,54
20	6,572	610,3	1,19	4,710	0,494	0,249	23,9	1,45
30	11,665	595,2	1,15	4,796	0,747	0,230	25,7	1,38
40	15,544	579,5	1,10	4,899	0,458	0,216	27,9	1,34
50	20,326	562,8	1,05	5,020	0,433	0,202	30,3	1,32

Таблиця 8. Фізичні властивості фреону 12 (рідина) на лінії насичення.

t, °C	p, бар	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	r, МДж/кг	C <sub>ср</sub> , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^{-4}$ , 1/К	Pr
10	4,293	1361	150,1	0,950	0,077	0,204	24,55	3,44
20	5,673	1327	144,7	0,967	0,072	0,199	26,62	3,55
30	7,445	1292	138,8	0,984	0,068	0,194	27,20	3,66
40	9,595	1254	132,1	1,001	0,063	0,191	28,92	3,82
50	12,146	1213	124,6	1,084	0,058	0,186	32,98	4,21

Таблиця 9. Фізичні властивості фреону -22 (рідина) на лінії насичення.

t, °C	p, бар	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	r, МДж/кг	C <sub>ср</sub> , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^{-4}$ , 1/К	Pr
10	6,855	1249	198,3	1,213	0,091	0,199	29,53	3,32
20	9,169	1213	188,4	1,246	0,087	0,197	30,51	3,41
30	12,023	1176	177,3	1,279	0,083	0,196	33,70	3,55
40	15,485	1132	164,8	1,312	0,079	0,196	39,95	3,67
50	19,642	1084	155,3	1,344	0,074	0,196	45,50	3,78

Таблиця 10. Густина розчинів NaCl і CaCl<sub>2</sub> (кг/м<sup>3</sup>).

Хлористий натрій NaCl				Хлористий кальцій CaCl <sub>2</sub>			
концентрація, %	Температура розчину, °C			концентрація, %	Температура розчину, °C		
	-5	-10	-15		-10	-20	-30
13	1102	-	-	18	1170	-	-
14	1110	-	-	19	1180	-	-
15	1117	1119	-	20	1190	-	-
16	1125	1125	-	21	1201	1205	-
17	1134	1135	-	22	1211	1215	-
18	1142	1144	-	23	1222	1226	-
19	1148	1149	1151	24	1238	1237	-
20	1160	1162	1163	25	1244	1248	-
21	1168	1169	1171	26	1254	1259	1263

Таблиця 11. Середній коефіцієнт об'ємного розширення  $\beta \cdot 10^{-4}, 1/K$

Хлористий натрій NaCl				Хлористий кальцій CaCl <sub>2</sub>			
концентрація, %	Температура розчину, °C			концентрація, %	Температура розчину, °C		
	0	-10	-20		-10	-20	-30
10	1,8	1,8	1,8	15	1,9	1,3	0,8
15	2,7	2,7	2,6	20	2,8	2,4	2,1
20	3,6	3,2	2,8	25	3,5	3,3	3,1
23	3,8	3,4	3,0	30	4,0	4,0	3,9

Таблиця 12. Фізичні властивості розчину NaCl.

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Концентрація	темпер. замерзання	$t$ , °C	$C$ , кДж/(кг·K)	$\lambda$ , Вт/(м·K)	$\nu \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с	Pr
1120	16,2	-12,2	-12	3,500	0,533	3,84	28,3
			-10	3,504	0,535	3,18	23,2
			-5	3,508	0,544	2,58	18,6
			0	3,512	0,552	2,72	15,1
1140	18,8	-15,1	-15	3,425	0,524	4,19	31,0
			-10	3,439	0,533	3,40	24,8
			-5	3,433	0,542	2,74	19,8
			0	3,442	0,550	2,25	16,1
1260	21,2	-18,2	-18	3,354	0,518	5,24	39,4
			-15	3,358	0,522	4,55	33,9
			-10	3,362	0,530	3,70	27,1
			-5	3,366	0,539	2,96	21,5

Таблиця 13. Фізичні властивості розчину CaCl<sub>2</sub>.

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Конце- нтрація	темпер замер- зання	t, °C	C, кДж/ (кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с	Pr
1170	18,9	-15,7	-15	3,065	0,523	5,27	35,9
			-10	3,086	0,529	4,00	27,3
			-5	3,098	0,537	2,94	19,8
1190	20,9	-19,2	-15	3,014	0,521	5,53	38,2
			-10	3,024	0,527	4,25	28,9
			-5	3,034	0,535	3,22	21,5
1220	23,6	-25,7	-25	2,889	0,504	9,48	66,5
			-20	2,889	0,511	7,77	53,8
			-15	2,910	0,518	6,20	42,5
			-10	2,910	0,523	4,87	33,0
1240	25,7	-31,3	-30	2,763	0,494	12,0	83,0
			-25	2,805	0,501	10,4	72,0
			-20	2,805	0,508	8,52	58,5
			-15	2,847	0,514	6,75	46,3
			-10	2,847	0,521	5,40	36,6

## Література

1. Баскаков Б. В., Берг О. К. Теплотехника : [учеб. для студ. высш. тех. учеб. заведений] / Баскаков А.П., Берг О. К. – М.: Энергоиздат, 1982. – 264 с.
2. Матвеев Г. А., Казакевич Ф. П. Теплотехника : [учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений]/ Матвеев Г. А., Казакевич Ф. П. – М.: Высшая школа, 1981. – 480 с.
3. Швець І. Т., Голубінський В. І., Алабовський А. Н. Теплотехніка : [підручник для студ. вищих навч. закладів]/ Швець І. Т., Голубінський В. І. та ін. – К. : Вища школа, 1976. – 520 с.
4. Щукин А. А., Сушкин И. Н. Теплотехника : [учеб. для студ. высш. учеб. заведений] / Щукин А. А., Сушкин И. Н. – М. : Металлургия, 1973. – 480 с.
5. Алабовський А. Н., Недужій І. А. Технічна термодинаміка і теплопередача : [підручник для студ. вищих навч. закладів]/ – К.: Вища школа, 1990. – 254 с.
6. Исаченко В. П., Осина В. А., Сухомел Л. С. Теплопередача : [учеб. для студ. высш. тех. учеб. заведений] / Исаченко В. П., Осина В. А. и др. – М. : Энергия, 1981 – 417 с.
7. Краснощеков Е. А., Сухомел Л. С. Сборник задач по теплопередаче : [учеб.-метод. пособие] / Краснощеков Е. А., Сухомел Л. С. – М. : Энергия, 1975. – 198 с.
8. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи : [учеб. для студ. высш. тех. учеб. заведений] / Михеев М. А., Михеева И. М. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
9. Нащекин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : [учеб. для студ. высш. учеб. заведений] / Нащекин В. В. – М. : Высшая школа, 1975. – 496 с.
10. Рабинович А. М. Сборник задач по технической термодинамике : [учеб.-метод. пособие] / Рабинович А. М. – М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.

Навчально-методичне видання

**Козуб Юрій Гордійович**  
**Киричевський Ростислав Вікторович**  
**Калайдо Олександр Віталійович**

# **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ**

*Методичні вказівки до організації самостійної роботи  
студентів 3 курсу спеціальностей «Трудове навчання»,  
і «Професійна освіта» всіх форм навчання*

2-ге видання, доповнене

За редакцією авторів  
Комп'ютерний макет – Калайдо О. В.

---

Здано до склад. 24.08.2010 р. Підп. до друку 24.09.2010 р.  
Формат 60×84 1/16. Папір офсет. Гарнітура Times New Roman.  
Друк ризографічний. Ум. друк. арк. 3,72. Наклад 300 прим. Зам. № 126.

---

***Видавець і виготовлювач***  
**Видавництво державного закладу**  
**«Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»**  
вул. Оборонна, 2, м. Луганськ, 91011. т/ф (0642) 58-03-20.  
e-mail: [alma-mater@list.ru](mailto:alma-mater@list.ru)  
*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3459 від 09.04.2009 р.*