

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

Г. О. Кобалава, І. В. Калініченко

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до практичних занять з дисципліни
«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОНДИЦІОНУВАННЯ»**

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
галузі знань 14 «Електрична інженерія»
спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»
(освітня програма «Холодильні машини і установки»)

Рекомендовано Методичною радою НУК



2025

УДК 697.9(076)
К55

Автори:

Г. О. Кобалава, канд. техн. наук, доцент;
І. В. Калініченко, канд. техн. наук, доцент

Рецензент:

А. В. Грич, канд. техн. наук, доцент

Рекомендовано Методичною радою НУК

Кобалава Г. О.

К55 Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Теоретичні основи кондиціювання» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти галузі знань «Електрична інженерія» спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування» (освітня програма «Холодильні машини і установки») / Г. О. Кобалава, І. В. Калініченко. – Миколаїв : НУК, 2025. – 82 с.

Уміщено систему єдиних вимог, роз'яснень і рекомендацій щодо виконання, визначення структури, змісту, обсягів виконаних практичних робіт. Також наведені приклади оформлення практичних завдань.

Призначені для проведення практичних занять з курсу «Теоретичні основи кондиціювання» для студентів спеціальності «Енергетичне машинобудування».

УДК 697.9(076)

© Г. О. Кобалава, І. В. Калініченко, 2025
© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2025

ВСТУП

Дисципліна «Теоретичні основи кондиціювання» є важливою складовою підготовки фахівців у галузі енергетичного машинобудування та теплотехніки. Вона дає комплекс знань про фізичні процеси, що відбуваються при кондиціюванні повітря, а також методи розрахунку і проєктування систем кондиціювання для створення оптимальних параметрів мікроклімату в приміщеннях.

Основними завданнями вивчення дисципліни є:

- вивчення фізичних властивостей і параметрів стану повітря;
- засвоєння методів розрахунку процесів нагрівання, охолодження, зволоження та осушення повітря;
- вивчення принципів роботи систем кондиціювання та їх окремих елементів;
- набуття навичок проєктування систем кондиціювання повітря за допомогою розрахунків та з використанням довідкових даних.

У результаті вивчення курсу студенти повинні засвоїти теоретичні основи процесів кондиціювання повітря та оволодіти практичними методами розрахунку і проєктування систем кондиціювання для різних типів будівель і споруд. Ці знання та навички є базовими для подальшого вивчення спеціальних дисциплін та роботи за фахом інженера-теплотехніка.

У методичних вказівках представлено теоретичний і практичний матеріал необхідний для формування у студентів умінь та навичок, які дозволять майбутнім фахівцям успішно здійснювати проєктування та експлуатацію систем кондиціювання повітря.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1.

Основні властивості вологого повітря

Атмосферне повітря навколо нас є сумішшю сухого повітря з водяною паром (тобто вологе повітря).

Основні параметри вологого повітря:

- Температура повітря за сухим термометром (характеризує ступінь нагріву) t_c ;
- Температура за мокрим термометром (температура, до якої потрібно охолодити повітря, щоб воно стало насиченим при збереженні початкової ентальпії повітря) t_m ;
- Температура точки роси (температура, до якої потрібно охолодити ненасичене повітря, щоб воно стало насиченим при збереженні постійного вмісту вологи) t_p ;
- Питома теплоємність (фізична величина, яка визначає кількість тепла, яка необхідна для підвищення температури одиниці маси повітря на один градус Кельвіна) c_p ;
- Парціальний тиск (тиск окремої компоненти, яка міститься в суміші газів) P_n ;
- Вологовміст повітря d (кількість водяної пари, яка міститься в повітрі при певній температурі і тиску), який визначається за формулою:

$$d = \frac{m_{п.в}}{m_{с.в}} = 0,623 \frac{P_n}{P_6 - P_n} = 0,623 \frac{\phi P_n}{P_6 - \phi P_n}. \quad (1.1)$$

- Відносна вологість повітря (вимір вологості атмосферного повітря, який виражає відношення фактичної кількості водяної пари, що міститься в повітрі, до максимально можливої кількості водяної пари, яка може бути при даній температурі і тиску, виражене у відсотках) ϕ :

$$\varphi = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}} \cdot 100 \% . \quad (1.2)$$

- Абсолютна вологість повітря (кількість водяної пари, яка міститься в повітрі в певному об'ємі при певній температурі) e :

$$e = \frac{m_{\text{п}}}{V} = \frac{P_{\text{п}}}{R_{\text{п}} \cdot T} . \quad (1.3)$$

- Питома ентальпія вологого повітря (сума ентальпій сухого повітря і водяної пари) I :

$$I = I_{\text{с.п}} + I_{\text{п}} = 1,005t + (2500 + 1,8t) \cdot d \cdot 10^{-3} . \quad (1.4)$$

- Барометричний тиск (тиск, з яким атмосфера Землі діє на земну поверхню і всі тіла, що на ній розташовані) $P_{\text{б}}$:

$$P_{\text{б}} = P_{\text{с.в}} + P_{\text{п}} . \quad (1.5)$$

Характеристичні рівняння:

- Для сухої частини повітря:

$$P_{\text{п}} V = m_{\text{в.п}} R_{\text{в.п}} T . \quad (1.6)$$

- Для водяних парів:

$$P_{\text{с.в}} V = m_{\text{с.в}} R_{\text{с.в}} T . \quad (1.7)$$

Приклади розв'язання задач

1. Визначити вологовміст, ентальпію, густину вологого повітря при $t = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 60 \%$, $P_{\text{б}} = 0,098 \text{ МПа}$.

Розв'язання

Вологовміст повітря:

$$d = 0,623 \frac{\varphi P_{\text{н}}}{P_{\text{б}} - \varphi P_{\text{н}}} = 0,623 \frac{0,6 \cdot 2,34 \cdot 10^3}{98,0 \cdot 10^3 - 0,6 \cdot 2,34 \cdot 10^3} = 0,009 \text{ кг} / \text{кг} ,$$

де $P_{\text{н}}$ – тиск насиченої пари.

Ентальпія вологого повітря:

$$I = 1,005t + (2500 + 1,8t) \cdot d \cdot 10^{-3} = 1,005 \cdot 20 + \\ + (2500 + 1,8 \cdot 20) \cdot 0,009 = 42,9 \text{ кДж / кг}.$$

Густина вологого повітря:

$$\rho = \frac{P_6}{RT} = \frac{98 \cdot 10^3}{287 \cdot 293} = 1,165 \text{ кг / м}^3.$$

Розв'язати наступні задачі:

1. Визначити вологовміст, ентальпію, густину вологого повітря при наступних параметрах повітря:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_c, ^\circ\text{C}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\phi, \%$	30	40	50	60	30	40	50	60	30	40
$P_6, \text{МПа}$	0,098	0,097	0,096	0,098	0,097	0,096	0,098	0,097	0,096	0,098

Контрольні питання

1. Що таке вологе повітря?
2. Які основні характеристики вологого повітря?
3. Що таке абсолютна і відносна вологість повітря?
4. Від чого залежить вологість повітря?
5. Як вимірюється вологість повітря?
6. Що таке точка роси і як вона пов'язана з вологістю повітря?
7. Як впливає вологість повітря на людину та інші живі організми?
8. Що таке конденсація вологи та з чим вона пов'язана?
9. Для чого потрібно регулювати вологість повітря в приміщеннях?
10. Які існують способи регулювання вологості повітря?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2.

I-d-діаграма вологого повітря

I-d-діаграма вологого повітря (рис. 1) графічно пов'язує всі параметри, що визначають тепловологий стан повітря: ентальпію, вміст води, температуру, відносну вологість, парціальний тиск водяної пари.

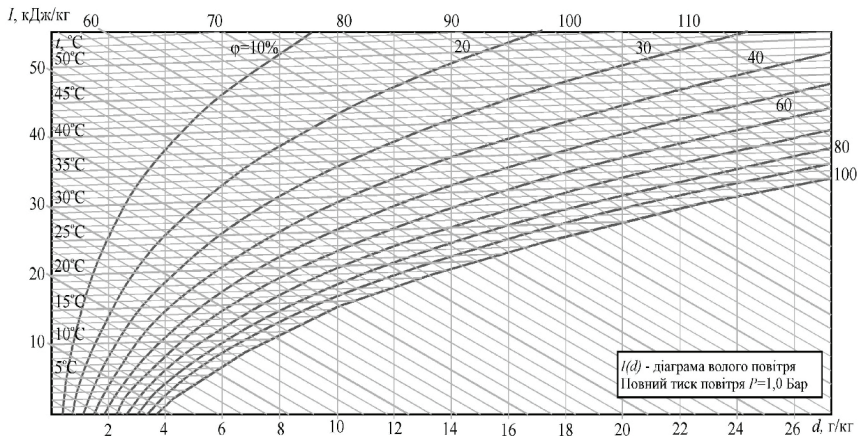


Рис. 1. *I-d*-діаграма вологого повітря

Діаграма побудована в косокутній системі координат, що дозволяє розширити область ненасиченого вологого повітря та робить діаграму зручною для графічних побудов. По осі ординат діаграми відкладені значення ентальпії I , кДж/кг сухої частини повітря, осі абсцис, спрямованої під кутом 135° до осі I , відкладені значення вмісту води d , г/кг сухої частини повітря. Поле діаграми розбито лініями постійних значень ентальпії $I = \text{const}$ і вмісту води $d = \text{const}$. Також

У нижній частині $I-d$ -діаграми розташована крива, що має самостійну вісь ординат. Вона пов'язує вологовміст d , г/кг, з тиском водяної пари p_n , кПа. Вісь ординат цього графіка є шкалою парціального тиску водяної пари p_n .

1. Визначити параметри вологого повітря, якщо воно має температуру по сухому термометру $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та вологовміст $d = 4\text{ г/кг}$.

Розглянемо *I-d*-діаграму (рис. 2) Знайдемо точку, яка відповідає стану даного повітря.



На I - d -діаграмі знаходимо ізотерму $t = 20^\circ\text{C}$ та лінію вологовмісту $d = 4$ г/кг. На їхньому перехресті знайдемо точку В.

Визначимо інші параметри вологого повітря:

- відносна вологість повітря $\phi = 28\%$, ентальпія $I = 30,3$ кДж/кг, температура мокрого термометра $t_m = 10,7^\circ\text{C}$, температура точки роси $t_p = 0,8^\circ\text{C}$.

2. Визначити відносну вологість повітря ϕ , якщо температура точки роси $t_p = 4^\circ\text{C}$, а температура мокрого термометра $t_m = 12,5^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Розглянемо I - d -діаграму.

Побудуємо точку А для визначення значення відносної вологості повітря. Для цього проведемо допоміжну ізотерму $t_p = 4^\circ\text{C}$ до перехрестя з лінією насичення повітря, тобто $\phi = 100\%$. Далі проводимо допоміжну ізотерму $t_m = 12,0^\circ\text{C}$ до перехрестя з лінією насичення повітря, а отже, отримуємо значення ентальпії для вологого повітря. Ставимо точку А, яка повинна лежати на перехресті ліній постійної ентальпії та вологовмісту (рис. 3).

Відносна вологість повітря ϕ дорівнює 32 %.

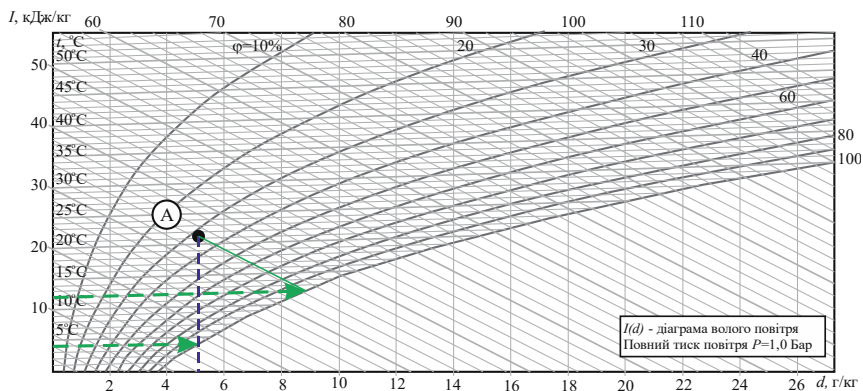


Рис. 3. I - d -діаграма вологого повітря

Розв'язати наступні задачі:

1. Визначити температуру точки роси t_p , мокрого термометра t_m при наступних параметрах повітря (I - d -діаграму для визначення параметрів дивись у додатку № 1):

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_c, ^\circ\text{C}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\phi, \%$	30	40	50	60	30	40	50	60	30	40

2. У результаті вимірювань, виконаних за допомогою психрометра, отримано наступні значення температур:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_c, ^\circ\text{C}$	20	22	24	26	28	30	20	22	24	26
$t_m, ^\circ\text{C}$	16	18	20	21	24	25	15	19	21	22

Необхідно визначити параметри вологого повітря: вологовміст d , ентальпію I , вологість ϕ , температуру точки роси t_p та парціальний тиск P_p (I - d -діаграму для визначення параметрів дивись у додатку № 1).

Контрольні питання

1. Що таке I - d -діаграма і для чого вона використовується?
2. Які параметри повітря відображаються на I - d -діаграмі?
3. Як на I - d -діаграмі позначаються лінії сталої вологості та сталої ентальпії?
4. Як з I - d -діаграми можна визначити параметри стану вологого повітря?
5. Як використовується I - d -діаграма для аналізу процесів зміни стану повітря при кондиціюванні?
6. Як за допомогою I - d -діаграми розрахувати необхідну витрату теплоти чи холоду для процесу кондиціювання повітря?

7. Як визначити за $I-d$ -діаграмою кількість вологи, що конденсується чи випаровується при процесі кондиціювання повітря?
8. Від чого залежить положення $I-d$ -діаграми для реального вологого повітря?
9. Як побудувати $I-d$ -діаграму за заданими параметрами повітря?
10. Для чого в кондиціонерах використовуються датчики температури та вологості повітря на основі $I-d$ -діаграм?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3. Процеси нагрівання, охолодження та змішування повітря

Процеси сухого нагріву та охолодження зображено на I - d -діаграмі (рис. 4):

- процес B_1B_2 – сухий нагрів; процес B_1B_3 – сухе охолодження;
- процес $B_1B_4B_5$ – охолодження з осушенням повітря.

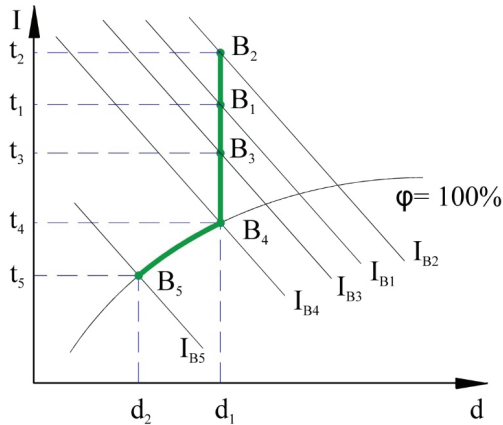


Рис. 4. Процеси сухого нагріву та охолодження повітря

Витрата теплоти в теплообміннику на нагрів повітря масою m (параметри змінюються від I_{B1} , t_1 до стану I_{B2} , t_2) визначається з рівняння:

$$Q = mc(t_2 - t_1) = m(I_{B2} - I_{B1}). \quad (3.1)$$

Витрата холоду при охолодженні повітря масою m (параметри змінюються від I_{B1} , t_1 до стану I_{B3} , t_3) визначається з рівняння:

$$Q_{\text{хол}} = mc(t_1 - t_3) = m(I_{B1} - I_{B3}). \quad (3.2)$$

Кількість конденсату, який утворюється при осушенні повітря (параметри змінюються від I_{B1} , t_1 до стану t_5 , d_2), визначається з рівняння:

$$W_k = m(d_1 - d_2) \cdot 10^{-3}. \quad (3.3)$$

Приклади розв'язання задач

1. Повітря має параметри: $\phi = 40\%$, $t = 22^\circ\text{C}$, витрата повітря $G = 1000$ кг/год. Воно нагрівається у поверхневому теплообміннику до температури $t = 38^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Необхідно визначити ентальпію та відносну вологість повітря після нагріву та витрату використаної теплоти. Зобразити процес на I - d -діаграмі.

Процес нагріву повітря зображено лінією $B_n B_k$ (рис. 5). Таким чином, параметри повітря після нагріву наступні: $\phi = 17\%$, $I = 55$ кДж/кг.

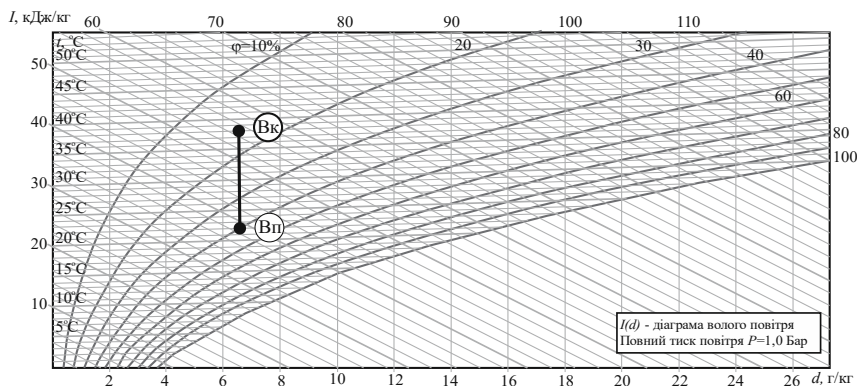


Рис. 5. Процес нагріву повітря

Для визначення витрати теплоти на нагрів повітря скористаємося наступною формулою:

$$Q = G(I_{B2} - I_{B1}) = 1000(55 - 38,6) = 16400 \text{ кДж/год (4,56 кВт)}.$$

2. Повітря має параметри: $\phi = 40 \%$, $t = 22^\circ\text{C}$ та витрата повітря $G = 1000 \text{ кг/год}$. Воно охолоджується у поверхневому теплообміннику до температури $t = 5^\circ\text{C}$. Необхідно визначити витрату холоду та кількість сконденсованої вологи. Зобразити процес на I - d -діаграмі.

Розв'язання

Зобразимо початок та кінець процесу охолодження на I - d -діаграмі. Визначимо ентальпію I та вологовміст d на початку і в кінці процесу (рис. 6).

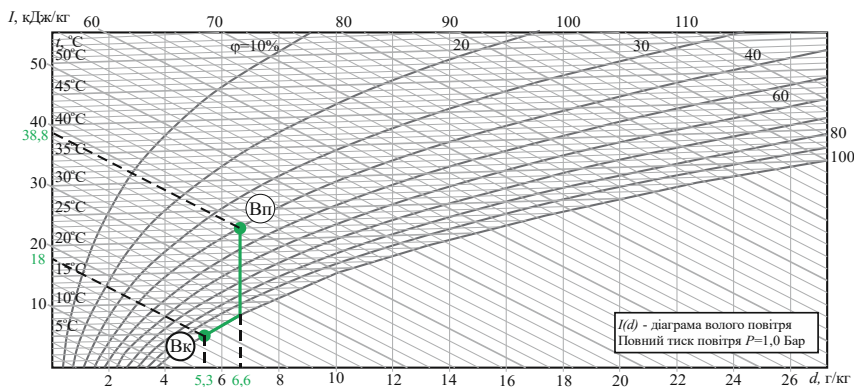


Рис. 6. Процес охолодження повітря

Для визначення витрати холоду на охолодження повітря скористаємося формулою:

$$\begin{aligned} Q_{\text{хол}} &= G(I_{B1} - I_{B2}) = 1000(38,8 - 18,0) = \\ &= 20800 \text{ кДж/год (5,78 кВт)}. \end{aligned}$$

Кількість сконденсованої води знайдемо з наступної залежності:

$$W_k = G(d_{B1} - d_{B2}) = 1000(6,6 - 5,3) \cdot 10^{-3} = 1,3 \text{ кг/год.}$$

3. 1 кг повітря А з параметрами: $\phi = 50 \%$, $d = 5 \text{ г/кг}$ змішується з 4 кг повітря В з параметрами: $I = 48 \text{ кДж/кг}$, $t = 20^\circ\text{C}$. Необхідно визначити параметри змішаного повітря ϕ_3 та I_3 .

Розв'язання

Визначимо положення точок А і В на I - d -діаграмі (рис. 7). Далі проведемо пряму лінію АВ. Розділимо відрізок АВ на п'ять частин. Відкладемо 4 частини від т. А у напрямку до т. В, таким чином отримавши т. С. Ця точка відповідатиме стану змішаного повітря ($\phi_3 \approx 72 \%$ та $I_3 \approx 44 \text{ кДж/кг}$).

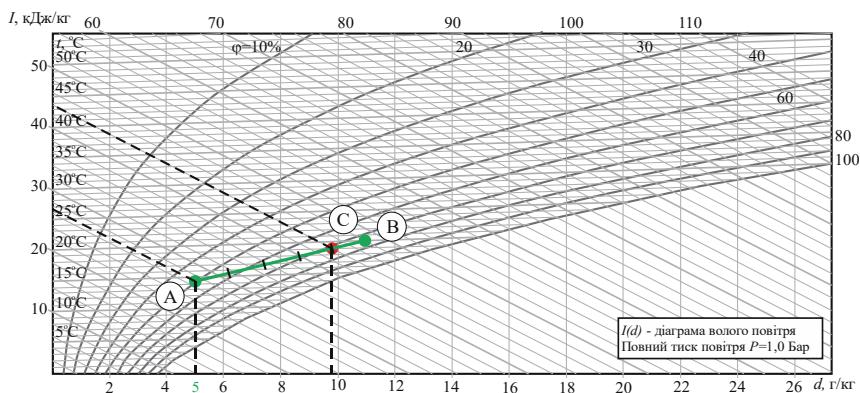


Рис. 7. Визначення параметрів змішаного повітря

Визначити точку С можна й іншим шляхом, з розрахованих ентальпії I_C та вологовмісту d_C змішаного повітря. Складемо рівняння теплового балансу та рівняння матеріального балансу по водяних парах:

$$m_A I_A + m_B I_B = (m_A + m_B) I_C,$$

$$m_A d_A + m_B d_B = (m_A + m_B) d_C,$$

де m_A, m_B – маса повітря,
 I_A, I_B, I_C – ентальпія повітря,
 d_A, d_B, d_C – вологовміст повітря.

З першого рівняння визначимо I_C :

$$I_C = \frac{m_A I_A + m_B I_B}{m_A + m_B}.$$

З I - d -діаграми знімемо показники $I_A = 26,8$ кДж/кг. Враховуючи це, I_C дорівнює:

$$I_C = \frac{1 \cdot 26,8 + 4 \cdot 48}{1 + 4} = 43,8 \text{ кДж/кг}.$$

На перехресті відрізка АВ з ізоентальпією $I_C = 43,8$ кДж/кг визначатиметься точка С з параметрами змішаного повітря.

З другого рівняння визначимо d_C (знімемо з I - d -діаграми $d_B = 10,8$ г/кг):

$$d_C = \frac{m_A d_A + m_B d_B}{m_A + m_B} = \frac{1 \cdot 5 + 4 \cdot 10,8}{1 + 4} = 9,64 \text{ г/кг}.$$

Накресливши перпендикуляр з d_C до відрізка АВ, можна визначити точку С з параметрами змішаного повітря.

Розв'язати наступні задачі:

1. 2 кг повітря ($\phi = 50\%$, $t = 20^\circ\text{C}$) змішуються з 8 кг повітря ($t = 0^\circ\text{C}$, $d = 1$ г/кг). Визначити параметри змішаного повітря ϕ_{3M}, t_{3M} . Початкові значення обрати за варіантом:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_1 , кг	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
m_2 , кг	8	6	10	7	12	10	14	16	20	24
ϕ_1 , %	50	18	20	21	24	25	15	19	21	22
t_1 , °C	20	22	24	26	28	30	20	22	24	26
d_2 , %	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
t_2 , °C	0	2	4	2	0	0	2	4	2	0

2. Зовнішнє повітря з витратою 100000 кг/год з параметрами $t_1 = 10^\circ\text{C}$, $\phi = 60\%$ нагрівається до $t_2 = 15^\circ\text{C}$ у поверхневому повітронагрівачі. Визначити відносну вологість нагрітого повітря та витрату тепла Q . Початкові значення обрати за варіантом:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G , кг/год	100000	110000	120000	130000	140000	150000	120000	130000	140000	150000
t_1 , °C	10	12	14	18	20	22	10	12	14	18
ϕ , %	60	40	50	30	60	40	50	30	60	40
t_2 , °C	15	20	25	30	25	30	20	25	30	25

3. Повітря з витратою 20000 кг/год з параметрами $t_1 = 26^\circ\text{C}$, $\phi = 60\%$ охолоджується до $t_2 = 15^\circ\text{C}$. Визначити витрату холоду $Q_{\text{хол}}$ та відносну вологість охолодженого повітря. Початкові значення обрати за варіантом:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G , кг/год	20000	21000	22000	23000	24000	25000	20000	21000	22000	23000
t_1 , °C	26	28	30	32	34	36	30	32	34	36
ϕ , %	60	40	50	30	60	40	50	30	60	40
t_2 , °C	15	20	25	15	20	25	15	20	25	15

4. Зовнішнє повітря з параметрами $t_1 = 0^\circ\text{C}$, $\phi_1 = 80\%$ перевести в стан $t_2 = 20^\circ\text{C}$, $\phi_2 = 90\%$ за допомогою підігріву та адіабатичного зволоження. Зобразити процеси на $I-d$ -діаграмі. Початкові значення обрати за варіантом:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5
$\phi_1, \%$	80	70	60	80	70	60	80	70	60	80
$t_2, ^\circ\text{C}$	20	25	30	35	25	30	35	30	35	15
$\phi_2, ^\circ\text{C}$	90	80	70	90	80	70	90	80	70	90

Контрольні питання

1. Які процеси відбуваються при нагріванні повітря в кондиціонері?
2. Від чого залежить витрата теплоти на нагрівання повітря?
3. Як розрахувати поверхню нагріву для повітронагрівача кондиціонера?
4. Яке обладнання використовується для охолодження повітря в системах кондиціювання?
5. Як визначити витрату холоду на охолодження та кондиціювання повітря?
6. Від чого залежить ефективність процесу охолодження повітря?
7. З якою метою застосовується змішування повітряних потоків у кондиціонерах?
8. Як розрахувати параметри змішаного повітряного потоку?
9. Як графічно зобразити процеси змішування повітря на $I-d$ -діаграмі?
10. Як оптимізувати процеси нагрівання, охолодження та змішування повітря в кондиціонерах?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4.

Тепло- та вологообмін між повітрям і водою

Криволінійний трикутник

Можливі напрямки процесів взаємодії повітря та води представлено на I - d -діаграмі вологого повітря в області криволінійного трикутника (рис. 8).

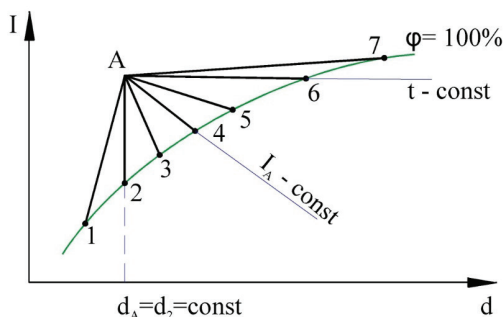


Рис. 8. I - d -діаграма вологого повітря в області криволінійного трикутника

Направлення променя процесу залежить від співставлення температур повітря (t_c , t_m , t_p) та води t_w .

При $t_w > t_c$ – лінія A7 (процес супроводжується підвищенням температури, ентальпії та вологовмісту повітря).

При $t_w = t_c$ – лінія A6 (процес ізотермічного зволоження повітря).

При $t_m < t_w < t_c$ – лінія A5 (ентальпія та вологовміст збільшуються, температура зменшується).

При $t_w = t_m$ – лінія A4 (процес адіабатичного зволоження та охолодження повітря).

При $t_p < t_w < t_m$ – лінія АЗ (процес охолодження та зволоження повітря).

При $t_w = t_p$ – лінія А2 (процес сухого охолодження повітря, зменшуються температура та ентальпія при постійному значенні вологовмісту).

При $t_w < t_p$ – лінія А1 (зменшення температури повітря при зменшенні його вологовмісту, тобто з осушенням повітря).

Процеси зволоження та осушення повітря

- Витрата води при адіабатичному зволоженні повітря G_w :

$$G_w = G(d_4 - d_A) \cdot 10^{-3}. \quad (4.1)$$

- Витрата холоду в зрошувальних камерах форсуночних (ЗКФЗ) води при адіабатичному зволоженні повітря $G_{хол}$:

$$G_{хол} = G(I_A - I_1). \quad (4.2)$$

- Кількість сконденсованих парів води при осушенні повітря $G_w^{кон}$:

$$G_w^{кон} = G(d_A - d_1) \cdot 10^{-3}. \quad (4.3)$$

Приклади розв'язання задач

1. Повітря має параметри $t = 24^\circ\text{C}$, $\phi = 50\%$. Визначити параметри повітря після проходження камери зрошування (впорскується циркуляційна вода).

Розв'язання

- На практиці відносна вологість повітря на виході з ЗКФЗ при адіабатичному зволоженні складає 90–95 %.
- Розглянемо I - d -діаграму (рис. 9).

- Таким чином визначаємо початковий стан повітря (точка А) на I - d -діаграмі вологого повітря. Кінцевий стан повітря відповідатиме точці О ($\phi = 90 \%$, $I_A = I_O$). При цьому $I = 48$ кДж/кг, $d = 11,7$ г/кг, $t_c = 18,2^\circ\text{C}$, $t_m = 17^\circ\text{C}$, $t_p = 16,5^\circ\text{C}$, $\phi = 90 \%$.

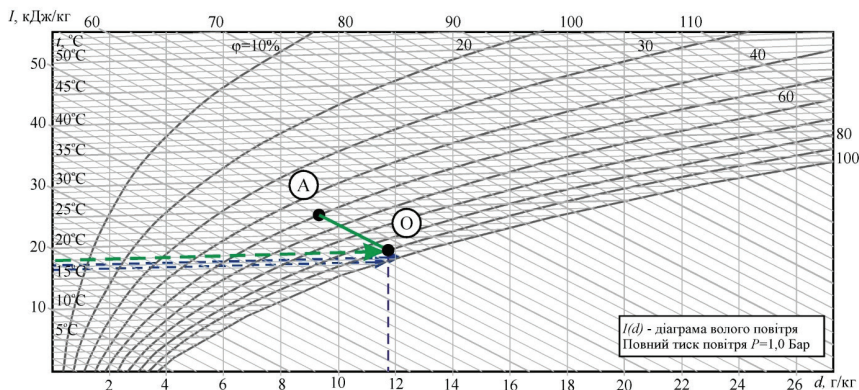


Рис. 9. I - d діаграма вологого повітря

2. Повітря має параметри $t = 18^\circ\text{C}$, $\phi = 50 \%$. При яких умовах можливе його адиабатичне зволоження в ЗКФЗ? При яких умовах можливе осушення повітря в ЗКФЗ?

Розв'язання

- Адиабатичне зволоження повітря відбувається при $t_w = t_m$.
- Осушення повітря водою можливе при $t_w < t_p$.
- Розглянемо I - d -діаграму (рис. 10).
- Так, з I - d -діаграми видно, що адиабатичне зволоження повітря відбуватиметься при $t_m = 12^\circ\text{C}$.
- Осушення повітря відбуватиметься при $t_w < 7^\circ\text{C}$.

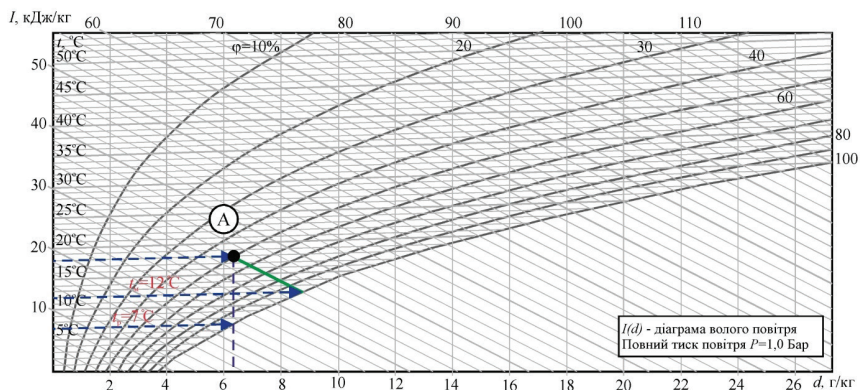


Рис. 10. I - d -діаграма вологого повітря

Розв'язати наступні задачі:

1. При якому режимі роботи зрошувальної камери температура повітря за мокрим термометром на вході та на виході з камери однакова?

2. Повітря на вході в ЗКФЗ має параметри $t_1 = 25^\circ\text{C}$, $\phi = 60\%$; на виході з ЗКФЗ температура повітря $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Визначити витрату холоду $Q_{\text{хол}}$, якщо витрата повітря 40000 кг/год. Початкові значення обрати за варіантом:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G , кг/год	40000	41000	42000	43000	44000	45000	40000	41000	42000	43000
t_1 , $^\circ\text{C}$	25	28	30	32	34	36	30	32	34	36
ϕ , %	60	40	50	30	60	40	50	30	60	40
t_2 , $^\circ\text{C}$	10	12	10	12	20	22	15	10	15	12

3. Визначити параметри повітря на виході з зрошувальної камери, якщо вона працює в режимі адіабатичного охолодження, та параметри повітря на вході: $t_1 = 22^\circ\text{C}$, $t_p = 4^\circ\text{C}$. Початкові значення обрати за варіантом:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, ^\circ\text{C}$	22	25	20	28	30	22	25	20	28	30
$t_p, ^\circ\text{C}$	4	6	6	6	8	6	4	8	4	4

4. Повітря з параметрами $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_m = 10,5^\circ\text{C}$. Як привести повітря в стан $t_2 = 2^\circ\text{C}$, $\phi_2 = 90\%$? Зобразити процеси на $I-d$ -діаграмі. Початкові значення обрати за варіантом:

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_1, ^\circ\text{C}$	20	22	25	20	28	22	25	20	28	22
$t_m, ^\circ\text{C}$	10,5	12	12,5	10,5	12	12,5	10,5	12	12,5	11
$t_2, ^\circ\text{C}$	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2
$\phi_2, ^\circ\text{C}$	90	95	90	95	90	95	90	95	90	95

Контрольні питання

1. Як відбувається теплообмін між повітрям та водою в кондиціонерах?
2. Від чого залежить інтенсивність теплообміну між повітрям та водою?
3. Які фактори впливають на швидкість випаровування та конденсації вологи з повітря?
4. Що таке масовіддача при вологообміні між повітрям і водою?
5. Для чого будують процеси тепло- та вологообміну на $I-d$ -діаграмі у вигляді криволінійного трикутника?
6. Що означають вершини криволінійного трикутника на $I-d$ -діаграмі?
7. Як розрахувати параметри повітря за криволінійним трикутником?
8. Як графічно визначити необхідну витрату теплоти та холоду за криволінійним трикутником?
9. Як розрахувати поверхню теплообміну за криволінійним трикутником на $I-d$ -діаграмі?
10. Де застосовують криволінійний трикутник у кондиціонерах на практиці?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5.
Розрахунки при побудові процесів СКП на $I-d$ -діаграмі
вологого повітря. Побудова променя процесу

Розташування променя процесу на $I-d$ -діаграмі вологого повітря визначають кутовим коефіцієнтом (або тепловологим відношенням) ε [кДж/кг]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta I}{\Delta d} = \frac{Q_{\text{п}}}{W}, \quad (5.1)$$

де $Q_{\text{п}}$ – потік повної теплоти, кДж/год;

W – витрата вологи, кг/год;

ΔI – зміна ентальпії, кДж/кг;

Δd – зміна вологовмісту повітря, кг/кг.

Якщо початкові параметри повітря мають різні значення, а ε – однакові, то лінії, що характеризують зміну стану повітря, будуть паралельними.

Визначення параметрів припливного повітря

Температура припливного повітря:

$$t_{\text{пш}} = t_{\text{п}} - \Delta t_{\text{доп}}, \quad (5.2)$$

де $\Delta t_{\text{доп}}$ – допустимий перепад температур, °С, який залежить від вибору принципової схеми повітророзподілу.

Для розрахунку повітрообміну приймають при подачі повітря:

- безпосередньо в робочу зону:

$$\Delta t_{\text{доп}} = 2^{\circ}\text{C};$$

- на висоті 2,5 м та вище:

$$\Delta t_{\text{доп}} = (4-6)^{\circ}\text{C};$$

- на висоті більше ніж 4 м від підлоги:

$$\Delta t_{\text{доп}} = (6-8)^{\circ}\text{C};$$

- повітророзподільниками (плафонами):

$$\Delta t_{\text{доп}} = (8-15)^{\circ}\text{C}.$$

Визначення параметрів повітря, що видаляється

Температуру повітря, що видаляється системами вентиляції і СКП, можна визначити за рівнянням:

$$t_{\text{вп}} = t_{\text{п}} + \text{grad } t (H - h), \quad (5.3)$$

де $\text{grad } t$ – градієнт температури по висоті приміщення вище робочої зони, $^{\circ}\text{C}/\text{м}$;

H – висота приміщення, м;

h – висота від підлоги, м.

Градієнт температури по висоті приміщення визначають залежно від питомих надлишків явного тепла в приміщенні по табл. 5.1.

Таблиця 1. Градієнт температури по висоті приміщення

Питомі виділення явної теплоти $q_{\text{я}}$, Вт/м ³	Градієнт температури по висоті $\text{grad } t^{\circ}$, C/м	Примітка
<i>більше ніж 23,2</i>	0,8–1,5	Менші значення приймають для холодного періоду року, більші – для теплого
<i>11,6–23,2</i>	0,3–1,2	
<i>менше ніж 11,6</i>	0–0,5	

Визначення продуктивності СКП

Для окремих випадків, коли повітря з приміщень не видаляється місцевими відсмоктувачами і не забирається на технологічні потреби, повітрообмін (продуктивність СКП) визначають, кг/год:

а) за умовою видалення повної теплоти:

$$\frac{3,6 \sum_{\text{п}}}{I_{\text{вп}} I_{\text{пп}}}; \quad (5.4)$$

б) за умовою видалення явної теплоти:

$$G = \frac{3,6 \cdot Q_{\text{я}}}{c(t_{\text{вп}} - t_{\text{пп}})}; \quad (5.5)$$

в) для видалення надлишкової вологи:

$$G = \frac{n \cdot W}{d_2 - d_1}; \quad (5.6)$$

г) для видалення шкідливостей (пари, газів):

$$L = \frac{z}{z_2 - z_1}, \quad (5.7)$$

де z – кількість газу (пари), що виділяється у приміщенні, мг/год;

z_2 – концентрація даного газу у повітрі, що видаляється, мг/м³ (якщо видалення з робочої зони $z_2 = \text{ПДК}$);

z_1 – концентрація даного газу у припливному повітрі, мг/м³ ($z_1 = \text{до } 0,3\text{ПДК}$).

Приклади розв'язання задач

1. Зобразити промінь процесу зміни тепловологого стану повітря в приміщенні, в якому початковий стан повітря відповідав $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $\phi = 50\%$. Кількість теплонадходження дорівнює 2000 Вт, вологовиділення – 2 кг/год.

Розв'язання

Визначимо числове значення кутового коефіцієнта променя процесу:

$$\varepsilon = \frac{3,6Q_{\text{п}}}{W} = \frac{3,6 \cdot 2000}{2} = 3600 \text{ кДж/кг}.$$

На I - d -діаграмі вологого повітря визначимо т. В0, що відповідає початковому стану повітря.

Далі визначимо розташування лінії, що відповідає значенню $\varepsilon = 3600$ кДж/кг. Поєднаємо т. 0 °С на осі I лінією 3600 на шкалі кутових коефіцієнтів, що нанесені по периметру I - d -діаграми вологого повітря.

Через т. В0 проводимо лінію, паралельну пунктирній. Ця лінія буде променем процесу у приміщенні (рис. 11).

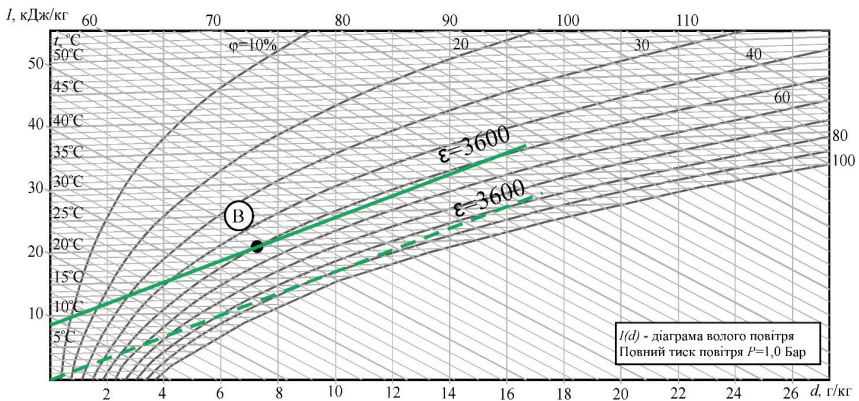


Рис. 11. I - d -діаграма вологого повітря

2. Визначити можливу температуру припливного повітря у приміщенні, висота якого 6 м, для двох варіантів:

- якщо повітря передається через плафони;
- якщо повітря передається безпосередньо в робочу зону (на висоту 1,5 м від підлоги);
- температура внутрішнього повітря $t_{\text{п}} = 20$ °С.

Розв'язання

Визначимо температуру припливного повітря за формулою:

$$\text{а) } t_{\text{пп}} = t_{\text{п}} - \Delta t_{\text{доп}} = 20 - 10 = 10^{\circ}\text{C} ;$$

$$\text{б) } t_{\text{пп}} = t_{\text{п}} - \Delta t_{\text{доп}} = 20 - 2 = 18^{\circ}\text{C} .$$

3. Визначити можливу температуру видаленого повітря у приміщенні, висота якого 6 м, якщо площа дорівнює 800 м^2 , виділення явної теплоти 200000 Вт . Розрахунок провести для холодного та теплого періодів року. Температура внутрішнього повітря $t_{\text{п}} = 20^{\circ}\text{C}$.

Розв'язання

Визначимо питоме значення виділення явної теплоти:

$$q_{\text{я}} = \frac{Q_{\text{я}}}{S \cdot H} = \frac{200000}{800 \cdot 6} = 41,6 \text{ Вт/м}^3 .$$

Відповідно до рівняння (5.3) та таблиці 5.1 визначимо температуру видаленого повітря:

для теплого періоду

$$t_{\text{вп}} = t_{\text{п}} + \text{grad } t (H - h) = 20 + 1,5(6 - 1,5) = 26,7^{\circ}\text{C} ;$$

для холодного періоду

$$t_{\text{вп}} = t_{\text{п}} + \text{grad } t (H - h) = 20 + 0,8(6 - 1,5) = 23,6^{\circ}\text{C} .$$

4. Визначити продуктивність СКП для аудиторії на 300 місць, якщо теплонадходження в приміщення ззовні (за рахунок сонячної радіації, яка включає і конвективний теплообмін) складають 5 кВт , температура внутрішнього повітря $t_{\text{вн}} = 20^{\circ}\text{C}$, відносна вологість $\phi_{\text{п}} = 50 \%$, висота аудиторії 6 м, об'єм – $V_{\text{п}} = 2400 \text{ м}^3$, припливне повітря подається в робочу зону, $q_{\text{л1}} = 116 \text{ Вт}$, $q_{\text{л2}} = 87 \text{ Вт}$, $w_{\text{л}} = 40 \text{ г/год}$.

Розв'язання

Побудуємо промінь процесу на $I-d$ -діаграмі (рис. 12).

Визначимо т. В з початковими параметрами. Далі визначимо теплоту та вологонадходження від людей з виразу:

$$Q_{\Pi} = n_{\Pi} \cdot q_{\Pi 1} = 300 \cdot 116 = 34800 \text{ БТ}$$

$$W_{\Pi} = n_{\Pi} \cdot w_{\Pi} = 300 \cdot 40 = 12000 \text{ г/год (12кг/год)},$$

де $n_{\text{п}}$ – кількість людей;

q_d, w_d – питомі значення тепло- та вологовиділення.

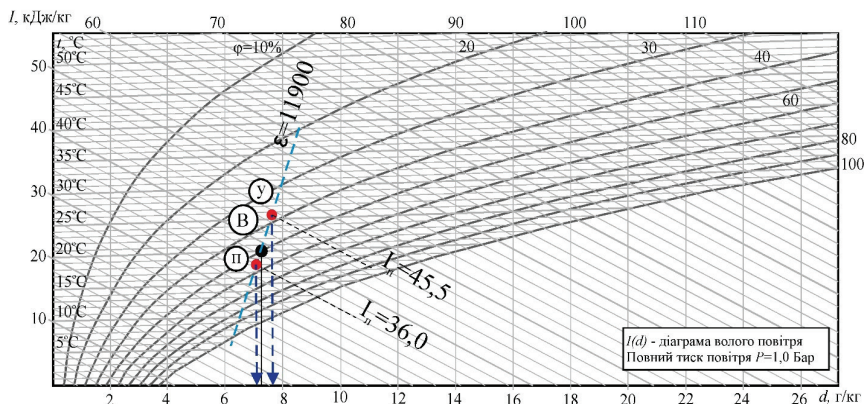


Рис. 12. I - d -діаграма вологого повітря

Визначимо тепловологе відношення ε (кутовий коефіцієнт променя) з виразу:

$$\varepsilon = \frac{3,6Q_{\text{п}}}{W_{\text{п}}} = \frac{3,6 \cdot (34800 + 5000)}{12} \approx 11940 \text{ КДж/кг}.$$

Проведемо промінь процесу для приміщення через т. В.

Визначимо температуру припливного повітря $t_{\text{пп}}$ за формулою (5.2):

$$t_{\text{пп}} = t_{\text{п}} - \Delta t_{\text{поп}} = 20 - 2 = 18^{\circ}\text{C}.$$

Визначимо температуру видаленого повітря $t_{\text{вп}}$ за формулою (5.3):

$$t_{\text{вп}} = t_{\text{вн}} + \text{grad } t (H - h) = 20 + 1,5(6 - 1,5) = 25,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де 1,5 – градієнт температури.

Явні тепловиділення від людей:

$$Q_{\text{я}} = n_{\text{л}} \cdot q_{\text{л2}} = 300 \cdot 87 = 26100 \text{ Вт}.$$

Питомі виділення явної теплоти визначено рівнянням:

$$q_{\text{я}} = \frac{\sum Q_{\text{я}}}{V_{\text{п}}} = \frac{26100 + 5000}{2400} = 12,96 \text{ Вт/м}^3.$$

Визначаємо точки П та У на промені процесу.

Визначаємо для припливного та видаленого повітря ентальпії $I_{\text{пп}}$ і $I_{\text{вп}}$ та вологовміст $d_{\text{пп}}$ і $d_{\text{вп}}$:

$$I_{\text{пп}} = 36 \text{ кДж/кг}; I_{\text{вп}} = 45,5 \text{ кДж/кг}; \\ d_{\text{пп}} = 7 \text{ г/кг}; d_{\text{вп}} = 7,5 \text{ г/кг}.$$

Визначаємо продуктивність СКП:

1) за умовою видалення повної теплоти:

$$G = \frac{3,6 \sum Q_{\text{п}}}{I_{\text{вп}} - I_{\text{пп}}} = \frac{3,6(34800 + 5000)}{45,5 - 36} = 15082 \text{ кг/год};$$

2) за умовою видалення явної теплоти:

$$G_{\text{я}} = \frac{3,6 \cdot (Q_{\text{я}} + 5000)}{c(t_{\text{вп}} - t_{\text{пп}})} = \frac{3,6 \cdot (26100 + 5000)}{1,005(25,4 - 18)} = 15055 \text{ кг/год};$$

3) для видалення шкідливостей (пари, газів):

$$L = \frac{z}{z_2 - z_1} = \frac{n \cdot 23}{2 - 0,3 \cdot 2} = \frac{300 \cdot 23}{2 - 0,3 \cdot 2} = 4928,6 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Як видно з розрахунків, найбільша продуктивність СКП відповідає умовам видалення повних теплонадлишків, її і приймають для проектування типової системи.

Розв'язати наступну задачу:

1. Визначити продуктивність СКП для аудиторії на X місць, якщо теплонадходження в приміщення ззовні (за рахунок сонячної радіації, яка включає і конвективний теплообмін) складають Q , температура внутрішнього повітря $t_{\text{вн}}$, відносна вологість $\phi_{\text{п}}$, висота аудиторії h , об'єм – $V_{\text{п}}$, припливне повітря подається в робочу зону, $q_{\text{л1}} = 116$ Вт, $q_{\text{л2}} = 87$ Вт, $w_{\text{л}} = 40$ г/год.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	100	200	300	150	250	350	100	200	150	250
Q , кВт	3	4	7	5	6	7	5	6	7	5
$t_{\text{вн}}$, °C	22	20	24	25	18	20	22	20	23	25
$\phi_{\text{п}}$, %	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40
G , кг/год	40000	41000	42000	43000	44000	45000	40000	41000	42000	43000
h , м	6	5	4	6	5	4	6	5	4	5
$V_{\text{п}}$, м ³	1600	1800	2000	2200	2400	2600	1800	2000	2200	1600

Контрольні питання

1. Що таке промінь процесу та з якою метою його будують на $I-d$ -діаграмі?
2. За якими даними виконують побудову променя процесу на $I-d$ -діаграмі?
3. Як розрахувати витрати теплоти та холоду за променем процесу на $I-d$ -діаграмі?
4. Як визначити кількість конденсату, що утворюється за променем процесу на $I-d$ -діаграмі?
5. Як побудувати промінь процесу для реального вологого повітря?

6. Що таке байпасування повітря та як його зобразити на $I-d$ -діаграмі?
7. Як врахувати втрати тиску повітря при побудові променя процесу на $I-d$ -діаграмі?
8. Як оптимізувати розподіл теплоти та холоду за променем процесу?
9. Як перевірити правильність побудови променя процесу на $I-d$ -діаграмі?
10. Де застосовують побудову променів процесів у системах кондиціювання повітря на практиці?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6.
Побудова процесів обробки повітря в СКП
при прямоточних схемах.
Пряме ізоентальпійне охолодження повітря

Пряме ізоентальпійне охолодження повітря застосовують у СКП у теплий період для районів із сухим та жарким кліматом.

Для ізоентальпійного охолодження повітря направляють в зрошувальну форсункову камеру (ЗКФ), що працює на рециркуляційній воді. Отримання необхідних параметрів повітря забезпечує застосування регульованого процесу ЗКФ або схеми з байпасуванням повітря. При регульованому процесі задана вологість повітря на виході з камери зрошення досягається зміною кількості води, що подається до зрошувального простору, і застосуванням форсунок, що забезпечують необхідне розпилення води в широкому діапазоні зміни тиску перед ними.

У схемах з байпасуванням до зрошувального простору подається частина загальної витрати зовнішнього повітря, тоді як інша його частина проходить по обвідному байпасному каналу без обробки, після чого відбувається їх змішування.

Схему обробки повітря на $I-d$ -діаграмі наведено на рис. 13.

При регульованому процесі (рис. 13,*a*) пропонується наступний порядок графоаналітичної побудови на $I-d$ -діаграмі:

- знаходження точок З і В характеризують стан зовнішнього та внутрішнього повітря;
- визначення положення точки, тобто стан повітря на виході з зрошувальної камери. Для цього проводять допоміжну побудову: від точки В вниз по лінії постійного вмісту вологи відкладають відрізок B' , відповідний 1°C .

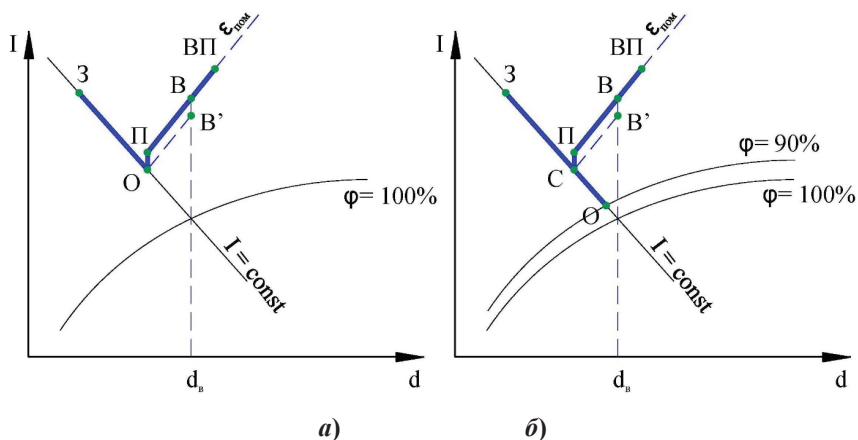


Рис. 13. Схема прямого ізоентальпійного охолодження повітря:

- а) із застосуванням регульованого процесу;
 б) із застосуванням байпасування повітря

- через точку B' проводять пряму, паралельну променю процесів у приміщенні (відповідно до величини кутового коефіцієнта до перетину з лінією в точці O);

- визначення положення точки Π (тобто стан припливного повітря) через точку O по лінії постійного вмісту вологи вгору відкладають відрізок, рівний одному градусу, такий же, як і відрізок BB' , отримуючи при цьому точку Π ;

- визначення положення точки $ВП$ (тобто стан повітря, що видаляється з приміщення). Вона знаходиться на перетині лінії кутового коефіцієнта променя процесу ϵ з ізотермою $t_{вп}$.

Таким чином, пряма $ПВВП$ – процес зміни стану повітря в приміщенні, пряма $ЗО$ – процес ізоентальпійного охолодження (зволоження) повітря в зрошувальній камері, пряма $ОП$ – процес нагрівання повітря у вентиляторі.

При байпасуванні частини зовнішнього повітря порядок побудови процесу на $I-d$ -діаграмі наступної:

- знаходження точок $З$ і $В$;
- визначення положення точки O , вона знаходиться

на перетині та ізоентальпи I_n з лінією відносної вологості $\phi = 90 \%$ і характеризує стан повітря на виході зі зрошувальної камери;

- визначення положення точки С (тобто стан повітря після змішування зовнішнього (байпасованого) повітря з повітрям зрошувальної камери). Для цього від точки В вниз по лінії постійного вологовмісту відкладають відрізок BB' , відповідний 1°C . Через точку B' проводять пряму, паралельну променю процесів у приміщенні (відповідно до кутового коефіцієнта променю процесу ϵ) до перетину з лінією постійної ентальпії в точці С;

- визначення точки П (тобто стан припливного повітря), через точку С по лінії постійного вологовмісту вгору відкладають відрізок 1° , отримуючи при цьому точку П;

- визначення положення точки ВП (тобто стан повітря, що видається з приміщення), вона знаходиться на перетині лінії кутового коефіцієнта променя процесу ϵ з ізотермою $t_{\text{вп}}$.

Таким чином, пряма ПВВП – процес зміни стану повітря в приміщенні, пряма ЗО – процес змішування зовнішнього повітря з повітрям з зрошувальної камери, пряма СП – процес нагрівання повітря у вентиляторі.

Витрата припливного повітря визначають за рівнянням:

$$G = \frac{3,6 \sum Q_{\text{п}}}{I_{\text{вп}} - I_{\text{пп}}}. \quad (6.1)$$

Витрата повітря, що проходить через байпас, визначають за рівнянням:

$$G_6 = G \frac{d_o - d_c}{d_o - d_3}. \quad (6.2)$$

Кількість води, що випарувалася в камері при зволоженні повітря:

$$G_w = G(d_o - d_3) \cdot 10^{-3}. \quad (6.3)$$

Приклади розв'язання задач

1. Визначити кількість випареної води в зрошувальній камері при ізоентальпійному охолодженні повітря в теплий період при регульованому процесі. Повне тепловиділення в приміщення $Q_{\text{п}} = 40$ кВт, вологовиділення $W = 20$ кг/год, параметри зовнішнього повітря: температура $t_3 = 30^\circ\text{C}$, ентальпія $I_3 = 44$ кДж/кг, параметри внутрішнього повітря: $t_{\text{в}} = 26^\circ\text{C}$, $\phi = 50\%$, температура повітря, що видаляється $t_{\text{вп}} = 28^\circ\text{C}$.

Розв'язання

Попередньо визначимо числове значення кутового коефіцієнта променя процесу у приміщенні за формулою:

$$\varepsilon = \frac{3,6Q_{\text{п}}}{W} = \frac{3,6 \cdot 40000}{20} = 7200 \text{ кДж/кг}.$$

Зобразимо схему обробки повітря на I - d -діаграмі для регульованого процесу, для цього визначимо положення базових точок: З, О, П, В, ВП (рис. 14).

Далі визначимо витрату припливного повітря:

$$G = \frac{3,6 \sum Q_{\text{п}}}{I_{\text{вп}} - I_{\text{пп}}} = \frac{3,6 \cdot 40000}{56 - 45} = 13091 \text{ кг/год}.$$

Визначимо кількість води, що випарувалася в зрошувальній камері при використанні регульованого процесу, за формулою:

$$G_w = G(d_o - d_3) \cdot 10^{-3} = 13091 \cdot (10,1 - 5,3) \cdot 10^{-3} = 62,8 \text{ кг/год}.$$

Таким чином, у зрошувальній камері випаровувалось 62,8 кг/год води.

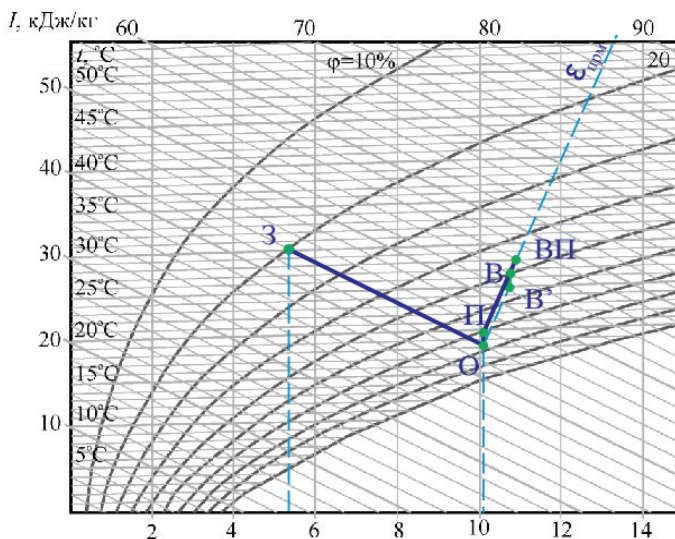


Рис. 14. Схема обробки повітря на I - d -діаграмі

Розв'язати наступну задачу:

1. Визначити кількість випареної води у зрошувальній камері при ізоентальпійному охолодженні повітря в теплий період при регульованому процесі. Повне тепловиділення в приміщення $Q_{\text{п}}$, вологовиділення W , параметри зовнішнього повітря: температура t_3 , ентальпія I_3 , параметри внутрішнього повітря: $t_{\text{п}}$, ϕ , температура повітря, що видаляється $t_{\text{вп}}$.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_{\text{п}}$, кВт	42	44	46	40	42	44	46	40	42	44
W , кг/год	18	20	22	18	20	22	18	22	20	18
t_3 , °C	32	34	30	32	34	30	32	34	30	32
I_3 , кДж/кг	46	44	46	44	46	44	46	44	46	44
$t_{\text{п}}$, °C	26	25	24	26	25	24	26	25	24	26
ϕ , %	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40
$t_{\text{вп}}$, °C	28	27	26	28	27	26	28	27	26	28

Контрольні питання

1. У чому полягає суть прямого ізоентальпійного охолодження повітря?
2. За рахунок чого відбувається зниження температури повітря при прямому ізоентальпійному охолодженні?
3. Яке обладнання використовується для прямого ізоентальпійного охолодження?
4. Як зобразити процес прямого ізоентальпійного охолодження на $I-d$ -діаграмі?
5. Від чого залежить ефективність прямого ізоентальпійного охолодження?
6. Як розрахувати необхідну витрату холодної води для прямого ізоентальпійного охолодження?
7. Які переваги має пряме ізоентальпійне охолодження порівняно зі звичайним охолодженням?
8. Як запобігти утворенню конденсату при прямому ізоентальпійному охолодженні?
9. Як реалізується регулювання прямого ізоентальпійного охолодження?
10. Де найчастіше застосовується пряме ізоентальпійне охолодження повітря?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7.

Прямоточна схема СКП для теплого періоду

Схема СКП при прямоточному способі обробки повітря для теплого періоду наведена на рис. 15.

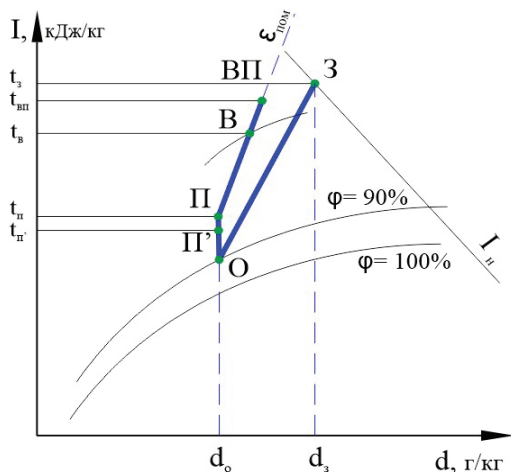


Рис. 15. Схема обробки повітря для прямоточної схеми СКП для теплого періоду

Розглянемо наступний порядок побудови процесу на I - d -діаграмі вологого повітря:

1. Зображення на діаграмі розташування точок 3 і В, які характеризують стан зовнішнього та внутрішнього повітря.
2. Проведення через точку В променя процесу з урахуванням величини кутового коефіцієнта.

3. Визначення положення інших точок:

- точка П (для стану припливного повітря) лежить на перетині ізотерми з променем процесу);
- для зображення точки П' (для стану припливного повітря на виході з другого повітряонагрівача ПН2) від точки П вертикально вниз відкладаємо відрізок в 1°C . Відрізок ПП' характеризує нагрів припливного повітря в повітропроводі і вентиляторі.
- для зображення точки О (для стану повітря на виході із зрошувальної камери) від точки П вниз по лінії постійного вологовмісту проводять лінію до перетину з відносною вологістю $\phi = 90\%$ (відрізок ОП' характеризує нагрів повітря в другому повітряонагрівачі ПН2);
- точка ВП (для стану повітря, яке видається з приміщення) лежить на перетині ізотерми з променем процесу (відрізок ПВЗ характеризує асиміляцію теплоти і вологи повітрям у приміщенні). Якщо температура повітря, що видається дорівнює температурі повітря в приміщенні $t_{\text{вп}} = t_{\text{в}}$, то точка ВП відповідає положенню точки В, і при побудові не вказується на $I-d$ -діаграмі.

Фізична сутність знайдених відрізків наступна: ЗО – це процес осушення та охолодження повітря в ЗКФ; ОП' – це процес нагріву повітря в другому повітряонагрівачі; П'П – це нагрів повітря в повітропроводах і вентиляторі; ПВЗ – це процес у приміщенні.

Витрати теплоти в другому повітряонагрівачі визначають за рівнянням:

$$Q_{\text{вн2}} = G_{\text{п}} (I_{\text{п}} - I_{\text{о}}). \quad (7.1)$$

Витрати холоду в ЗКФ визначають за рівнянням:

$$Q_{\text{хол}} = G_{\text{п}} (I_{\text{з}} - I_{\text{о}}). \quad (7.2)$$

Кількість сконденсованих парів води з повітря в ЗКФ:

$$W_k = G_{\Pi} (d_3 - d_o) \cdot 10^{-3}. \quad (7.3)$$

Приклади розв'язання задач

1. Побудувати процес обробки повітря на I - d -діаграмі вологого повітря для прямооточної системи кондиціювання повітря в теплий період року, якщо параметри внутрішнього повітря наступні: температура $t_b = 23^\circ\text{C}$, відносна вологість $\phi = 53\%$, параметри зовнішнього повітря: температура $t_3 = 25,7^\circ\text{C}$, ентальпія $I_3 = 52$ кДж/кг, теплонадлишки в приміщенні складають 53900 Вт, вологовиділення $W = 11,5$ кг/год, припливне повітря подається в робочу зону. Необхідно визначити витрату теплоти і холоду для обробки повітря.

Розв'язання

Попередньо визначимо числове значення кутового коефіцієнта променя процесу у приміщенні за формулою:

$$\varepsilon = \frac{3,6Q_{\Pi}}{W} = \frac{3,6 \cdot 53900}{11,5} = 16880 \text{ кДж/кг}.$$

На I - d -діаграмі вологого повітря визначимо положення базових точок: З, В (див. рис. 16).

Визначимо положення точки П на перетині ізотерми 21°C з променем процесу.

Температура припливного повітря, яке подається в робочу зону, визначається за формулою:

$$t_{\Pi\Pi} = t_b - \Delta t_{\text{доп}} = 23 - 2 = 21^\circ\text{C}.$$

Знімаємо значення ентальпії для точки П $- I_{\Pi} = 44,4$ кДж/кг.

Визначаємо положення точки О (для стану повітря на виході зі зрошувальної камери), відкладаючи відрізок від точки П вниз по лінії постійного вологовмісту ($d_o = 9,2$ г/кг) до перетину з відносною вологістю $\phi = 90\%$.

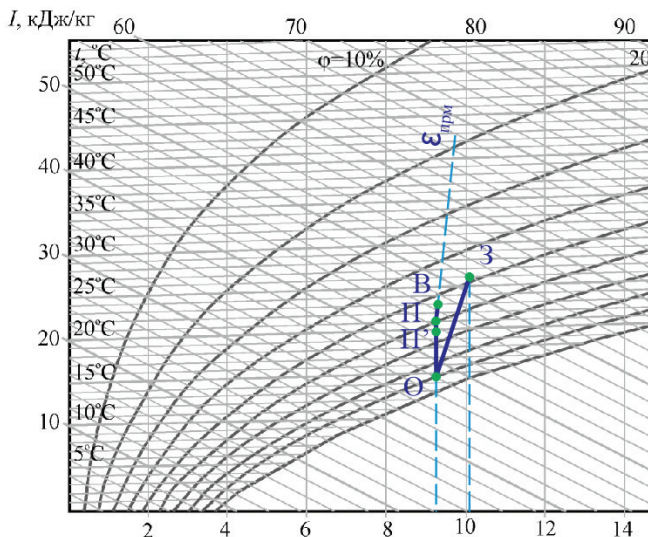


Рис. 16. Схема обробки повітря на I - d -діаграмі для прямооточної схеми СКП

Далі визначаємо положення точки П' (для стану повітря на виході з повітронагрівача другого ступеня). Для цього відкладемо відрізок вертикально вниз від точки П на $1,5^\circ\text{C}$, знаходимо ентальпію для точки П' $I_{\text{п}}' = 43$ кДж/кг.

Поеднуємо базові точки ЗОП'ПВ. Таким чином, відрізок ЗО – це процес в ЗФК, ПП' – процес нагріву повітря в повітронагрівачі та у вентиляторі, ПВ – процес у приміщенні.

Витрата теплоти в повітронагрівачі визначають за формулою:

$$Q_{\text{вн2}} = G_{\text{п}} (I_{\text{п}}' - I_{\text{о}}).$$

Для цього визначимо витрату припливного повітря:

$$G_{\text{п}} = \frac{3,6 \sum Q_{\text{п}}}{I_{\text{вп}} - I_{\text{пп}}} = \frac{3,6 \cdot 53900}{47 - 44,4} = 74631 \text{ кг/год.}$$

Тоді:

$$Q_{\text{вн2}} = 74631(43 - 38) = 373154 \text{ кДж/год (103,7 кВт)}.$$

Витрата холоду в ЗКФ:

$$Q_{\text{хол}} = G_{\text{п}}(I_3 - I_o) = 74631(52 - 38) = 1044831 \text{ кДж/год (290,2 кВт)}.$$

Розв'язати наступну задачу:

1. Побудувати процес обробки повітря на $I-d$ -діаграмі вологого повітря для прямооточної системи кондиціювання повітря в теплий період року, якщо параметри внутрішнього повітря наступні: температура $t_{\text{в}}$, відносна вологість ϕ , параметри зовнішнього повітря: температура t_3 , ентальпія I_3 , теплонадлишки в приміщенні складають $Q_{\text{п}}$, вологовиділення W , припливне повітря подається в робочу зону. Необхідно визначити витрату теплоти в повітронагрівачі і холоду для обробки повітря в ЗКФ.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_{\text{п}}$, кВт	52	54	56	50	52	54	56	50	52	54
W , кг/год	12	13	14	10	12	13	14	10	12	13
t_3 , °C	32	34	30	32	34	30	32	34	30	32
I_3 , кДж/кг	52	54	56	52	54	56	52	54	56	52
$t_{\text{в}}$, °C	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24
ϕ , %	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40

Контрольні питання

1. Які особливості прямооточної схеми СКП для теплого періоду?
2. За якою схемою виконують розрахунок прямооточної системи СКП для теплого періоду?
3. Як розрахувати витрати теплоти та холоду для прямооточної схеми СКП на теплий період?

4. Як побудувати процес обробки повітря для прямоточної схеми СКП на $I-d$ -діаграмі?
5. Як підібрати обладнання СКП за побудованим на $I-d$ -діаграмі процесом для теплого періоду?
6. Як розрахувати поверхні теплообмінників прямоточної схеми СКП для теплого періоду?
7. Як здійснити підбір циркуляційного насоса в прямоточній схемі СКП?
8. Як розрахувати випарник прямоточної схеми СКП для теплого періоду?
9. Як оптимізувати роботу прямоточної схеми СКП в теплий період за даними $I-d$ -діаграми?
10. Які переваги має прямоточна схема СКП порівняно з іншими схемами?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 8.

Прямоточна схема СКП для холодного періоду

Схема СКП при прямоточному способі обробки повітря для холодного періоду наведена на рис. 17.

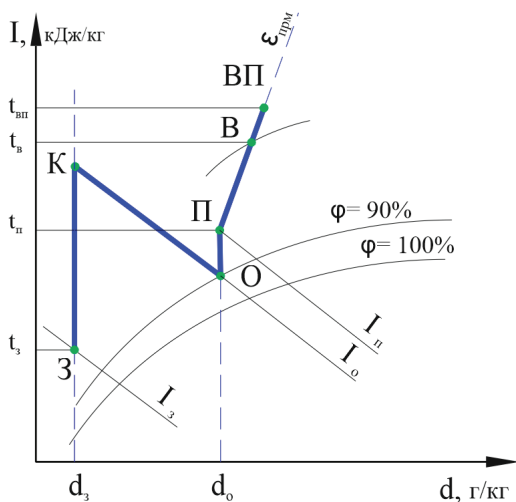


Рис. 17. Схема обробки повітря для прямоточної схеми СКП для холодного періоду

Розглянемо наступний порядок побудови процесу на I - d -діаграмі вологого повітря:

1. Зображення на діаграмі розташування точок 3 і В, які характеризують стан зовнішнього та внутрішнього повітря.
2. Проведення через точку В променя процесу з урахуванням величини кутового коефіцієнта.

3. Визначення положення точок П, ВП, О, К.

• Точка П (для стану припливного повітря) лежить на перетині ізоентальпії $I_{\text{пп}}$ припливного повітря з променем процесу. Числове значення ізоентальпії $I_{\text{пп}}$ припливного повітря для холодного періоду року визначаємо за формулою:

$$I_{\text{пп}} = I_{\text{вп}} - \frac{3,6 \cdot \sum Q_{\text{хол}}}{G_{\text{п}}}, \quad (8.1)$$

де $I_{\text{вп}}$ – питома ентальпія повітря, що видаляється з приміщення в холодний період року, кДж/кг (визначаємо за діаграмою в точці ВП);

$\sum Q_{\text{хол}}$ – сумарні повні теплонадлишки в приміщенні в холодний період року, Вт;

$G_{\text{п}}$ – продуктивність СКП в теплий період року, кг/год.

• Точка О (для стану повітря на виході із зрошувальної камери) від точки П вертикально вниз по лінії постійного вологовмісту проводять лінію до перетину з відносною вологістю $\phi = 90 \%$.

• Точка К (для стану повітря на виході з повітрянагрівача першого ступеня), від точки З вертикально вгору по лінії постійного вологовмісту проводять лінію до перетину з ізоентальпією $I_{\text{о}}$.

Поєднуємо базові точки ЗКОПВВП.

Фізична сутність знайдених відрізків наступна: ЗК – нагрів повітря в повітрянагрівачі першого ступеня, КО – процес адіабатного (ізоентальпійного) охолодження повітря; ОП – процес нагріву повітря в повітрянагрівачі другого ступеня; ПВВП – процес у приміщенні.

Витрата теплоти в повітрянагрівачі першого ступеня визначають за рівнянням:

$$Q_{\text{вн1}} = G_{\text{п}} (I_{\text{о}} - I_{\text{з}}). \quad (8.2)$$

Витрата теплоти в повітрянагрівачі другого ступеня визначають за рівнянням:

$$Q_{\text{вн2}} = G_{\text{п}} (I_{\text{п}} - I_{\text{o}}). \quad (8.3)$$

Витрата холоду в ЗКФ визначають за рівнянням:

$$Q_{\text{хол}} = G_{\text{п}} (I_{\text{з}} - I_{\text{o}}). \quad (8.4)$$

Визначимо кількість води, що випарувалася при адіабатному охолодженні повітря в ЗКФ:

$$W_{\text{в}} = G_{\text{п}} (d_{\text{o}} - d_{\text{к}}) \cdot 10^{-3}. \quad (8.5)$$

Приклади розв'язання задач

1. Необхідно визначити витрату теплоти і води для тепловологої обробки повітря в холодний період року для прямоточної системи кондиціювання повітря, якщо параметри зовнішнього повітря: температура $t_{\text{з}} = -15^{\circ}\text{C}$, ентальпія $I_{\text{з}} = -14$ кДж/кг, параметри внутрішнього повітря: температура $t_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$, відносна вологість $\phi = 50\%$, температура повітря, що видаляється $t_{\text{вп}} = 22^{\circ}\text{C}$, теплонадлишки в приміщенні складають $\Sigma Q_{\text{п}} = 200000$ кДж/год, вологовиділення $W = 10$ кг/год, витрата припливного повітря $G_{\text{п}} = 30000$ кг/год.

Розв'язання

Попередньо визначимо чисельне значення кутового коефіцієнта променя процесу у приміщенні за формулою:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{п}}}{W} = \frac{200000}{10} = 20000 \text{ кДж/кг}.$$

На I - d -діаграмі зображено процеси обробки повітря (рис. 18). Будуємо кутовий коефіцієнт променя процесу, точки З, В, ВП. Знімаємо значення ентальпії для точки ВП ($I_{\text{вп}} = 40,5$ кДж/кг).

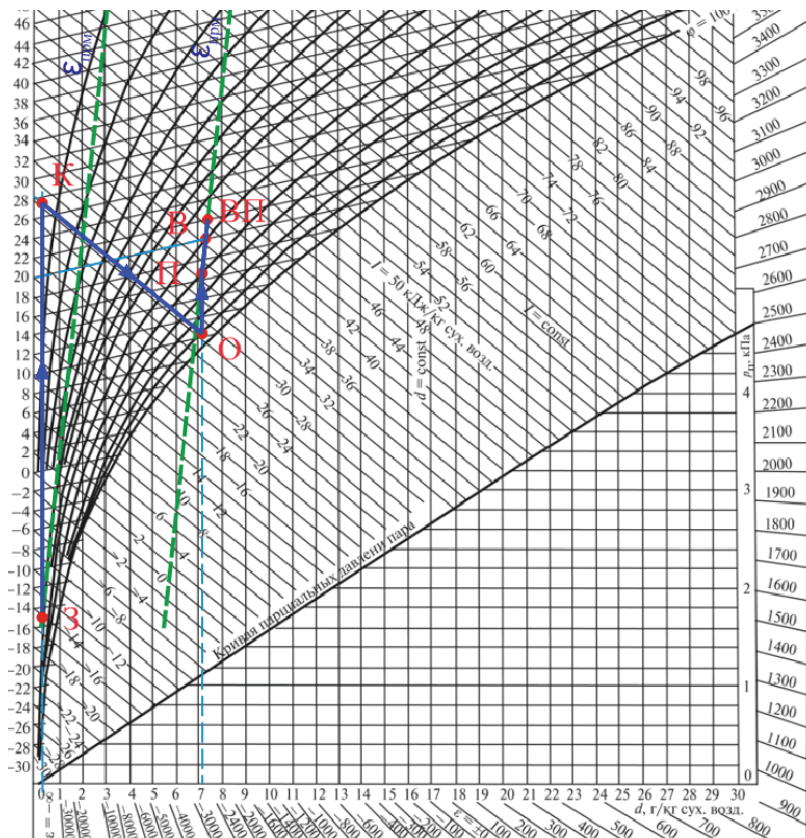


Рис. 18. Схема обробки повітря на I - d -діаграмі для прямооточної схеми СКП для холодного періоду

Для визначення положення точки П необхідно визначити ентальпію $I_{\text{пп}}$ припливного повітря для холодного періоду року (точка П лежить на перетині ізоентальпії $I_{\text{пп}}$ припливного повітря з променем процесу):

$$I_{\text{пп}} = I_{\text{вп}} - \frac{\sum Q_{\text{хол}}}{G_{\text{п}}} = 40,5 - \frac{200000}{30000} = 33,8 \text{ кДж/кг}.$$

Зображаємо точку П та знаходимо точку О (від точки П вертикально вниз по лінії постійного вологовмісту проводимо лінію до перетину з відносною вологістю $\phi = 90 \%$).

Для побудови точки К – від точки З вертикально вгору по лінії постійного вологовмісту проводимо лінію до перетину з ізентальпією I_o .

Таким чином всі точки процесів обробки повітря побудовано, з'єднуємо їх та визначаємо додаткові параметри:

$$I_o = I_k = 28,3 \text{ кДж/кг}; d_z = d_k = 0,4 \text{ г/кг}; d_o = 7,1 \text{ г/кг}.$$

Витрата теплоти в повітронагрівачі першого ступеня:

$$\begin{aligned} Q_{\text{вн1}} &= G_{\text{п}} (I_o - I_z) = 30000(28,3 - (-14)) = \\ &= 1269000 \text{ кДж/кг} (352,5 \text{ кВт}). \end{aligned}$$

Витрата теплоти в повітронагрівачі другого ступеня:

$$\begin{aligned} Q_{\text{вн2}} &= G_{\text{п}} (I_{\text{п}} - I_o) = 30000(33,8 - 28,3) = \\ &= 165000 \text{ кДж/кг} (45,8 \text{ кВт}). \end{aligned}$$

Визначимо кількість води, що випарувалася при адіабатному охолодженні повітря в ЗКФ:

$$W_w = G_{\text{п}} (d_o - d_k) \cdot 10^{-3} = 30000(7,1 - 0,4) \cdot 10^{-3} = 201 \text{ кг/год}.$$

Розв'язати наступну задачу:

1. Необхідно визначити витрату теплоти і води для тепловологої обробки повітря в холодний період року для прямоточної системи кондиціювання повітря, якщо параметри зовнішнього повітря: температура t_z , ентальпія I_z , параметри внутрішнього повітря: температура $t_{\text{в}}$, відносна вологість ϕ , температура повітря, що видаляється твп, теплонадлишки в приміщенні складають $\Sigma Q_{\text{п}}$, вологовиділення W , витрата припливного повітря $G_{\text{п}}$.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Sigma Q_{п}$, МДж/год	150	160	170	180	190	200	170	180	190	160
W , кг/год	8	8,5	9	9,5	10	12	13	12	9	10
t_3 , °C	-10	-11	-12	-14	-15	-12	-11	-14	-15	-12
I_3 , кДж/кг	-8	-10	-10	-12	-13	-10	-10	-12	-13	-10
$t_в$, °C	22	23	24	25	22	23	24	25	23	24
ϕ , %	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40
$t_{вп}$, °C	22	23	24	25	22	23	24	25	23	24
G , кг/год	25000	30000	25000	30000	25000	30000	25000	30000	25000	30000

Контрольні питання

1. Які особливості прямоточної схеми СКП для холодного періоду?
2. За якою послідовністю виконують розрахунок прямоточної системи кондиціонування для холодного періоду?
3. Як побудувати процес кондиціонування для прямоточної схеми СКП на $I-d$ -діаграмі в холодний період?
4. Як розрахувати витрати теплоти та холоду для прямоточної схеми СКП в холодний період за $I-d$ -діаграмою?
5. Як підібрати калорифер для прямоточної схеми СКП за даними $I-d$ -діаграми для холодного періоду?
6. Як розрахувати поверхню теплообміну калорифера в прямоточній схемі СКП для холодного періоду?
7. Як виконати вибір циркуляційного насоса в контурі охолодження прямоточної схеми СКП для холодного періоду?
8. Як розрахувати випарник прямоточної схеми СКП для холодного періоду?
9. Які переваги та недоліки має прямоточна схема СКП для холодного періоду?
10. Як оптимізувати роботу прямоточної схеми кондиціонування повітря для холодного періоду за даними $I-d$ -діаграми?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 9.
Побудова процесів обробки повітря
в СКП з рециркуляцією.
Схема СКП з першою рециркуляцією для теплого періоду.

Схема СКП з першою рециркуляцією для теплого періоду наведена на рис. 19.

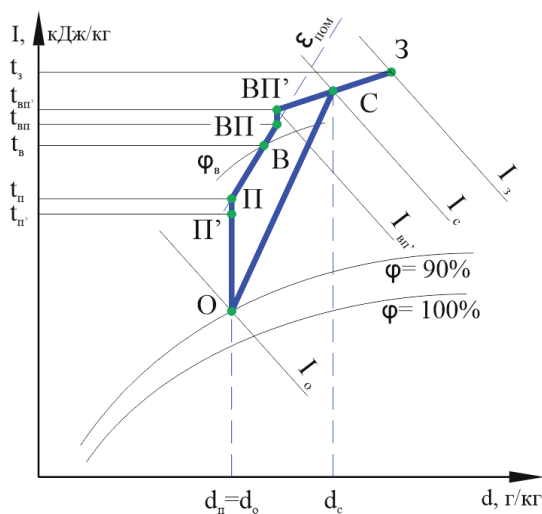


Рис. 19. Схема обробки повітря для теплого періоду
з рециркуляцією

Розглянемо наступний порядок побудови на I - d -діаграмі вологого повітря:

1. Визначимо положення точок 3, В, П, П', О, ВП (дивись Пр.р. № 7).

2. Далі визначимо положення точки ВП' (стан рециркуляційного повітря перед його змішуванням з зовнішнім повітрям), для чого від точки ВП по лінії постійного вологомісту відкладають верх відрізок на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (відрізок ВПВП' характеризує нагрів вихідного повітря в вентиляторі).

3. Знайдемо точку С (стан повітря після змішування рециркуляційного повітря з зовнішнім повітрям). Точки ВП' і З з'єднують прямою, отриманий відрізок ВП'З характеризує процес змішування рециркуляційного зовнішнього повітря. Точка С знаходиться на прямій ВП'З на перехресті з ентальпією I_c .

Питому ентальпію I_c точки С визначаємо за формулою:

$$I_c = \frac{G_3 \cdot I_3 + G_{lp} \cdot I_{vp'}}{G_n}, \quad (9.1)$$

де G_{lp} – витрата повітря першої рециркуляції, кг/год:

$$G_{lp} = G_n - G_3. \quad (9.2)$$

Точки С і О з'єднують прямою. Відрізок СО характеризує політропічний процес тепловологої обробки повітря в зрошувальній камері.

Витрата теплоти в повітронагрівачі визначають за формулою:

$$Q_{вн2} = G_n (I_n' - I_o). \quad (9.3)$$

Витрату припливного повітря визначають за формулою:

$$G_n = \frac{3,6 \sum Q_n}{I_{vp} - I_{np}}. \quad (9.4)$$

Витрата холоду в ЗКФ визначають з діаграми:

$$Q_{хол} = G_n (I_c - I_o). \quad (9.5)$$

Кількість сконденсованих парів води з повітря в ЗКФ:

$$W_{\kappa} = G_{\Pi} (d_{\text{с}} - d_{\text{o}}) \cdot 10^{-3}. \quad (9.6)$$

Приклади розв'язання задач

1. Побудувати процес обробки повітря на I - d -діаграмі вологого повітря для системи кондиціювання повітря з однією рециркуляцією в теплий період року, якщо параметри внутрішнього повітря наступні: температура $t_{\text{в}} = 24^{\circ}\text{C}$, відносна вологість $\phi = 50\%$, параметри зовнішнього повітря: температура $t_{\text{з}} = 28^{\circ}\text{C}$, ентальпія $I_{\text{з}} = 56$ кДж/кг, теплонадлишки в приміщенні складають 53900 Вт, вологовиділення $W = 11,5$ кг/год, припливне повітря подається на висоті 2,5 м. Необхідно визначити витрату теплоти і холоду для обробки повітря. Витрата зовнішнього повітря $G_{\Pi} = 30000$ кг/год.

Розв'язання

Попередньо визначимо чисельне значення кутового коефіцієнта променя процесу у приміщенні за формулою:

$$\varepsilon = \frac{3,6Q_{\Pi}}{W} = \frac{3,6 \cdot 53900}{11,5} = 16880 \text{ кДж/кг}.$$

На I - d -діаграмі вологого повітря визначимо положення базових точок: З, В (рис. 16).

Визначимо положення точки П на перетині ізотерми 19°C з променем процесу.

Температура припливного повітря, яке подається на висоті 2,5 м, визначається за формулою:

$$t_{\text{пп}} = t_{\text{в}} - \Delta t_{\text{доп}} = 24 - 4 = 20^{\circ}\text{C}.$$

Знімаємо значення ентальпії для точки П – $I_{\Pi} = 43,8$ кДж/кг.

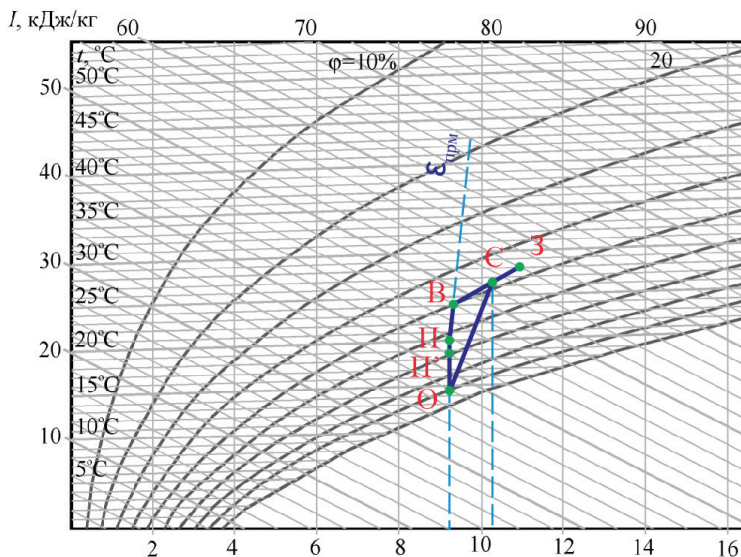


Рис. 20. Схема обробки повітря на I - d -діаграмі для схеми СКП з рециркуляцією для теплого періоду

Визначаємо положення точки О (для стану повітря на виході із зрошувальної камери), відкладаючи відрізок від точки П вниз по лінії постійного вологовмісту ($d_o = 9,2$ г/кг) до перетину з відносною вологістю $\phi = 90$ %. $I_o = 38$ кДж/кг, $t_o = 14,5^\circ\text{C}$.

Далі визначаємо положення точки П' (для стану повітря на виході з повітрянагрівача другого ступеня). Для цього відкладемо відрізок вертикально вниз від точки П на $1,5^\circ\text{C}$, знаходимо ентальпію для точки П: $I_{п'} = 42$ кДж/кг.

Витрати теплоти в повітрянагрівачі визначають за формулою:

$$Q_{\text{вн2}} = G_{\text{п}} (I_{\text{п'}} - I_o).$$

Для цього визначимо витрату припливного повітря:

$$G_{\Pi} = \frac{3,6 \sum Q_{\Pi}}{I_{\text{вп}} - I_{\text{пп}}} = \frac{3,6 \cdot 53900}{48 - 43,8} = 46200 \text{ кг/Год}.$$

Тоді:

$$Q_{\text{вн2}} = 46200(42 - 38) = 184800 \text{ кДж/год} (53,3 \text{ кВт}).$$

Визначаємо положення точки С (стан змішаного повітря). Точка С знаходиться на прямій ЗВ на перехресті з ізоентальпією I_c :

$$I_c = \frac{G_3 \cdot I_3 + G_{\text{лр}} \cdot I_{\text{вп}}}{G_{\Pi}} = \frac{30000 \cdot 56 + (46200 - 30000) \cdot 48}{46200} =$$

$$= 53,2 \text{ кДж/кг},$$

де $G_{\text{лр}}$ – витрата повітря першої рециркуляції, кг/год:
 $G_{\text{лр}} = G_{\Pi} - G_3$.

Точки С і О з'єднують прямою. Відрізок СО характеризує політропічний процес тепловологої обробки повітря в зрошувальній камері.

Витрата холоду при рециркуляції повітря:

$$Q_{\text{хол}}^{\text{р}} = G_{\Pi} (I_c - I_o) = 46200(53,2 - 38) = 702240 \text{ кДж/год} (195 \text{ кВт}).$$

Витрата холоду в ЗКФ:

$$Q_{\text{хол}} = G_{\Pi} (I_3 - I_o) = 46200(56 - 38) = 831600 \text{ кДж/год} (231 \text{ кВт}).$$

При рециркуляції повітря відбувається економія витрати холоду, яка дорівнює:

$$\Delta Q_{\text{хол}} = Q_{\text{хол}} - Q_{\text{хол}}^{\text{р}} = 231 - 195 = 36 \text{ кВт}.$$

Кількість сконденсованих парів води з повітря в ЗКФ:

$$W_k = G_{\Pi} (d_c - d_o) \cdot 10^{-3} = 46200(10,2 - 9,2) \cdot 10^{-3} = 46,2 \text{ кг/Год}.$$

Розв'язати наступну задачу:

1. Побудувати процес обробки повітря на $I-d$ -діаграмі вологого повітря для системи кондиціонування повітря з однією рециркуляцією в теплий період року, якщо параметри внутрішнього повітря наступні: температура $t_{в}$, відносна вологість ϕ , параметри зовнішнього повітря: температура $t_{з}$, ентальпія $I_{з}$, теплонадлишки в приміщенні $\Sigma Q_{п}$, вологовиділення W , припливне повітря подається на висоті 2,5 м. Необхідно визначити витрату теплоти і холоду для обробки повітря. Витрата зовнішнього повітря $G_{п}$.

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_{п}$, кВт	52	54	56	50	52	54	56	50	52	54
W , кг/год	12	13	14	10	12	13	14	10	12	13
$t_{з}$, °C	32	34	30	32	34	30	32	34	30	32
$I_{з}$, кДж/кг	52	54	56	52	54	56	52	54	56	52
$t_{в}$, °C	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24
ϕ , %	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40
$G_{п}$, кг/год	20000	20000	25000	25000	20000	20000	25000	25000	20000	25000

Контрольні питання

1. Що таке рециркуляція повітря і для чого її застосовують в системах кондиціонування?
2. Які переваги має схема СКП з першою рециркуляцією для теплого періоду?
3. Як побудувати процес кондиціонування на $I-d$ -діаграмі для схеми СКП з першою рециркуляцією для теплого періоду?
4. Як розрахувати витрати зовнішнього повітря і повітря, що рециркулює, для даної схеми?
5. Яким чином визначити необхідну поверхню повітроохолоджувача для схеми з першою рециркуляцією на теплий період?

6. Як розрахувати вологовипар і витрату води для повітроохолоджувача в даній схемі?
7. Яке обладнання використовується для догрівання повітря після повітроохолоджувача в схемі з першою рециркуляцією?
8. Як врахувати тепловтрати в повітроводах при розрахунку схеми з першою рециркуляцією?
9. Які вимоги висуваються до якості зовнішнього повітря, що надходить в систему з першою рециркуляцією?
10. Як оптимізувати роботу схеми СКП з першою рециркуляцією для теплого періоду за даними $I-d$ -діаграми?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 10.
Схема СКП з першою рециркуляцією
для холодного періоду

Наведено два варіанти схем систем кондиціонування повітря з першою рециркуляцією для холодного періоду (рис. 21):

1. Змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря проводять до першого повітронагрівача.
2. Змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря проводять після першого повітронагрівача.

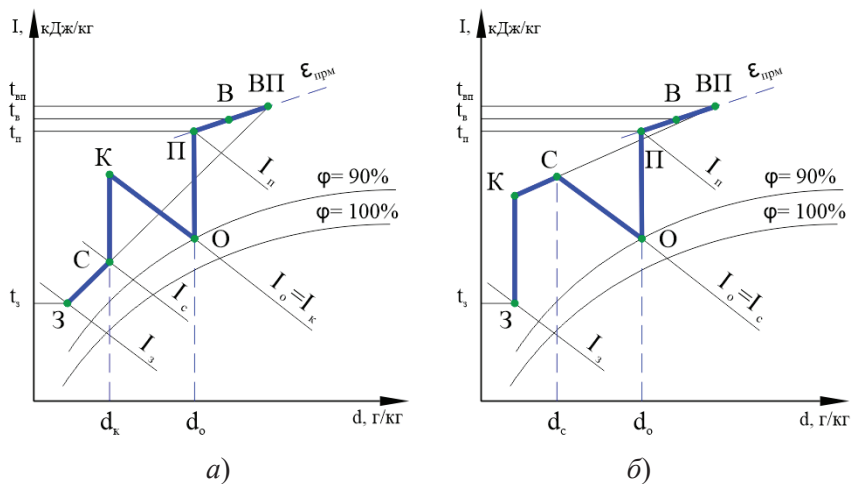


Рис. 21. Схеми обробки повітря для холодного періоду з рециркуляцією:

- a* – змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря відбувається до першого повітрянагрівача;
б – змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря відбувається після першого повітрянагрівача

Розглянемо перший варіант.

Пропонується наступний порядок побудови процесів на *I-d*-діаграмі вологого повітря:

- визначення положення точок З, В, ВП, П, О (дивись Пр.р. № 8);
- визначення положення точки С (стан повітря після змішування зовнішнього повітря з рециркуляційним.

Точки З і ВП з'єднують прямою лінією.

Відрізок ЗВП характеризує процес змішування рециркуляційного зовнішнього повітря, точка С знаходиться на прямій ЗВП на перетині з ентальпією точки С.

Ентальпію I_c точки С визначаємо за формулою:

$$I_c = \frac{G_3 \cdot I_3 + G_{lp} \cdot I_{vp}}{G_n}, \quad (10.1)$$

де G_{lp} – витрата повітря першої рециркуляції, кг/год:

$$G_{lp} = G_n - G_3. \quad (10.2)$$

Визначення положення точки К, яка характеризує стан повітря на виході з першого повітронагрівача ВН1 та знаходиться на перехресті лінії постійного вологовмісту та ентальпії.

Таким чином, ЗВП – це процес змішування зовнішнього і рециркуляційного повітря, СК – нагрів повітря в повітронагрівачі першого ступеня, КО – процес обробки повітря в зрошувальній камері, ОП – процес нагріву повітря в повітронагрівачі другого ступеня; ПВВП – процеси в приміщенні.

Розглянемо другий варіант.

Пропонується наступний порядок побудови процесів на *I-d*-діаграмі вологого повітря:

- визначення положення точок З, В, ВП, П, О (дивись Пр.р. № 8);
- визначення положення точки С (стан повітря після змішування зовнішнього повітря, яке нагріли в першому

повітронагрівачі з повітрям, що видаляється з приміщення). Ця точка розташована на перехресті ізоентальпії I_0 з лінією постійного вологовмісту d_c .

Чисельне значення d_c визначають з рівняння:

$$d_c = \frac{G_3 \cdot d_3 + G_{lp} \cdot d_{вп}}{G_{п}}. \quad (10.3)$$

Визначення положення точки К (характеризує стан повітря на виході з першого повітронагрівача ВН1) і знаходиться на перехресті лінії постійного вологовмісту d_3 та прямої СВП.

Таким чином, ЗК – це процес нагріву зовнішнього повітря в першому повітронагрівачі, КВП – це процес змішування нагрітого зовнішнього і рециркуляційного повітря, СО – це процес адіабатного зволоження повітря в зрошувальній камері, ОП – це процес нагріву повітря в другому повітронагрівачі, ПВВП – процеси в приміщенні.

Варто відмітити, що при рівних умовах витрати тепла на перший ступінь підігріву повітря однакові, незалежно від того, де відбувається змішування зовнішнього і рециркуляційного повітря: до чи після повітронагрівача першого ступеня.

Приклади розв'язання задач

1. Визначити можливість підмішування рециркуляційного повітря перед повітронагрівачем першого ступеня в СКП в холодний період при наступних розрахункових параметрах: зовнішнього повітря $t_3 = -27^\circ\text{C}$, $I_3 = -27$ кДж/кг, $d_3 = 0,1$ г/кг; внутрішнього повітря $t_{в} = 18^\circ\text{C}$, $\phi = 40\%$, температура повітря, що видаляється $t_{вп} = 22^\circ\text{C}$. Витрата припливного повітря $G_{пп} = 40000$ кг/год. Витрата зовнішнього повітря $G_3 = 26000$ кг/год, теплонадлишки в приміщенні складають 120000 Вт, вологонадлишки $W = 25$ кг/год.

Розв'язання

Попередньо визначимо чисельне значення кутового коефіцієнта променя процесу у приміщенні за формулою:

$$\varepsilon = \frac{3,6Q_{\text{хол}}}{W} = \frac{3,6 \cdot 120000}{25} = 17200 \text{ кДж/кг}.$$

Визначаємо ентальпію припливного повітря $I_{\text{пп}}$:

$$I_{\text{пп}} = I_{\text{вп}} - \frac{3,6 \sum Q_{\text{хол}}}{G_{\text{пп}}} = 36 - \frac{3,6 \cdot 120000}{40000} = 25,2 \text{ кДж/кг}.$$

Визначимо вологовміст повітряної суміші після підмішування рециркуляційного повітря до зовнішнього повітря:

$$d_c = \frac{G_z \cdot d_z + G_{\text{лр}} \cdot d_{\text{вп}}}{G_{\text{пп}}} = \frac{26000 \cdot 0,1 + (40000 - 26000) \cdot 5,4}{40000} = 2 \text{ г/кг}.$$

Як видно з рис. 22, т. С, яка характеризує стан повітряної суміші перед повітронагрівачем першого ступеня, лежить нижче лінії відносної вологості 100 %. Повітряна суміш відповідає насиченому повітрю при температурі -8° .

В реальних умовах у цьому повітрі відбудеться конденсація водяних парів з утворенням сніжинок. На вході у повітронагрівач буде утворюватися «льодяна шуба», що може призвести до його поломки.

Для даних умов вказана схема обробки повітря не може бути використана.

Розглянемо інший варіант. Зовнішнє повітря попередньо нагрівається в повітронагрівачі першого ступеня і тільки після цього до нього підмішується рециркуляційне повітря.

Визначимо стан зовнішнього повітря після повітронагрівача (т. К). На I - d -діаграмі відмітимо точку С', яка лежить на перетині ліній $d_c = 2 \text{ г/кг}$ та $I_o = 18,5 \text{ кДж/кг}$.

Точка К визначиться на перетині лінії вологовмісту для зовнішнього повітря з продовженням відрізка ВПС'.

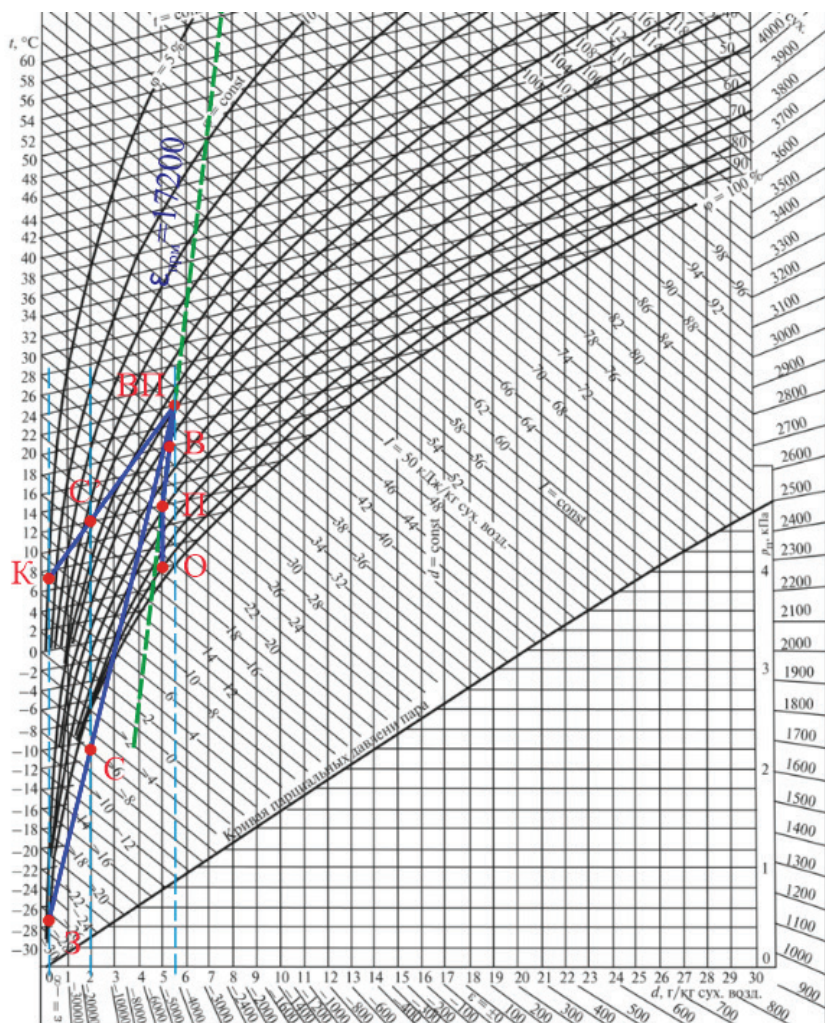


Рис. 22. Схема обробки повітря на I - d -діаграмі для схеми СКП з рециркуляцією для холодного періоду (змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря відбувається до першого повітрянагрівача)

Як видно з рис. 22, попередній нагрів зовнішнього повітря до температури 8° і наступне підмішування до нього частини

повітря, що видаляється, дозволяє отримати суміш з відносною вологістю приблизно 22 %. Саме таку схему можна рекомендувати для реалізації на практиці.

Розв'язати наступну задачу:

1. Визначити можливість підмішування рециркуляційного повітря перед повітрянагрівачем першого ступеня в СКП в холодний період при наступних розрахункових параметрах: зовнішнього повітря t_3, I_3, d_3 ; внутрішнього повітря t_v, ϕ_v ; температура повітря, що видаляється $t_{\text{вп}}$. Витрата припливного повітря $G_{\text{пп}}$. Витрата зовнішнього повітря G_3 , теплонадлишки в приміщенні складають $Q_{\text{хол}}$, вологонадлишки W .

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q_{\text{хол}}$, кВт	14	12	14	13	14	12	14	12	14	12
W , кг/год	24	25	24	25	24	25	24	25	24	25
t_3 , °C	-25	-24	-23	-27	-26	-25	-24	-23	-27	-26
I_3 , кДж/кг	-26	-25	-24	-28	-27	-26	-25	-24	-28	-27
d_3 , г/кг	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
t_v , °C	23	24	25	26	23	24	25	26	23	24
ϕ_v , %	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40
$t_{\text{вп}}$, °C	20	20	22	22	20	20	22	22	20	20
$G_{\text{пп}}$, кг/год	40000	30000	40000	30000	40000	30000	40000	30000	40000	30000
G_3 , кг/год	26000	16000	26000	16000	26000	16000	26000	16000	26000	16000

Контрольні питання

1. Яка основна мета використання рециркуляції повітря в системах кондиціонування повітря (СКП) у холодний період?
2. Поясніть різницю між двома варіантами схем СКП з першою рециркуляцією.
3. Які переваги має змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря до першого повітрянагрівача?

4. Які переваги має змішування зовнішнього та рециркуляційного повітря після першого повітрянагрівача?
5. Як впливає розташування точки змішування на енергоефективність системи?
6. Які фактори слід враховувати при виборі між двома варіантами схем?
7. Як змінюється температура повітря на виході з першого повітрянагрівача в обох варіантах схем?
8. Яким чином розташування точки змішування впливає на контроль вологості в приміщенні?
9. Порівняйте складність регулювання температури припливного повітря в обох варіантах схем.
10. Які заходи безпеки слід враховувати при використанні рециркуляції повітря в СКП для холодного періоду?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 11.

Двоступеневе охолодження повітря

Для зменшення повітрообміну в теплий період року застосовують двоступеневе охолодження повітря.

Двоступінчасте охолодження повітря передбачає охолодження в два ступеня. Спочатку повітря охолоджують в поверхневому теплообміннику, потім в ЗКФ (прямим способом). Воду для теплообмінника (холодоносії) отримують у додатковому контактному апараті (градириня, бризкальний басейн або форсуночна камера).

Схема процесу наведена на рис. 23.

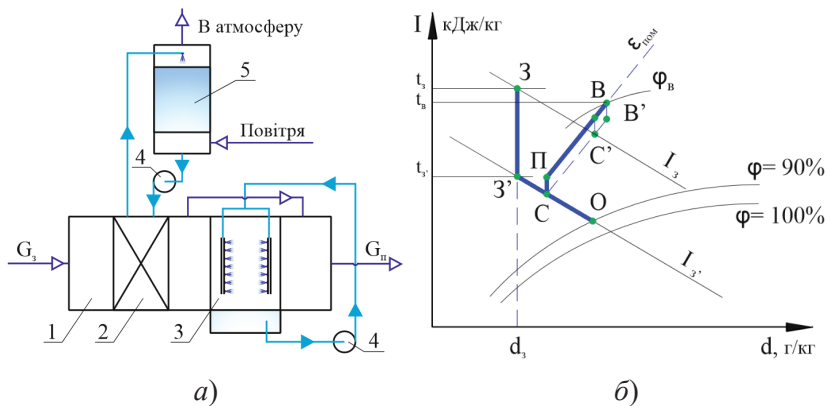


Рис. 23. Двоступеневе охолодження повітря:

a – схема: 1 – кондиціонер; 2 – теплообмінник; 3 – ЗКФ; 4 – насоси;
5 – градирня; *б* – схема обробки повітря на *I-d*-діаграмі

Побудову процесу починають з нанесення на $I-d$ -діаграмі точок З, В. Потім розраховують температуру води, яка була охолоджена в градирні і яка поступає в теплообмінник t_{w1} :

$$t_{w1} = t_{\text{мн}} + (2...6)^{\circ}\text{C}, \quad (11.1)$$

де $t_{\text{мн}}$ – температура зовнішнього повітря за мокрим термометром, $^{\circ}\text{C}$.

Також розрахунком визначають температуру повітря на виході з теплообмінника:

$$t_{3'} = t_{w1} + \Delta t, \quad (11.2)$$

де Δt – перепад температури між теплоносіями в теплообміннику, $^{\circ}\text{C}$ (приймають $\Delta t \geq 3^{\circ}\text{C}$).

Визначають положення точки З', яка характеризує стан повітря на виході з теплообмінника (знаходиться на перетині температури зовнішнього повітря і вологовмісту зовнішнього повітря).

Потім визначають положення точок О, С, П.

Базові точки, які поєднуються прямими лініями, мають наступний фізичний зміст:

ЗЗ' – охолодження повітря в теплообміннику;

З'О – ізоентальпійне охолодження повітря в ЗКФ (пряме охолодження);

СП – нагрів повітря в припливному вентиляторі;

ПВ – процес у приміщенні.

Приклади розв'язання задач

1. Визначити, до якої мінімальної температури можна охолодити зовнішнє повітря, застосовуючи двоступеневе охолодження та звичайне пряме ізоентальпійне охолодження. Зовнішнє повітря має наступні параметри: $t_3 = 30^{\circ}\text{C}$, $\phi_3 = 20\%$.

Розв'язання

Побудову процесу починають з нанесення на $I-d$ -діаграмі точки 3 (рис. 24).

Визначаємо кінцеву температуру повітря при ізоентальпійному охолодженні: для цього знаходимо точку О (стан повітря на виході ЗКФ). Вона лежить на перетині ентальпії $I_3 = 43,5$ кДж/кг з вологістю повітря $\phi = 90$ %. З рисунка видно, що температура при прямому ізоентальпійному охолодженні дорівнює $16,6^\circ\text{C}$.

Зобразимо на $I-d$ -діаграмі процес двоступеневого охолодження повітря. Для цього послідовно знаходимо точки 3'О'.

За допомогою рівняння визначаємо температуру повітря після теплообмінника (перша ступінь охолодження):

$$t_{3'} = t_{w1} + \Delta t = (15,5 + 2) + 3 = 20,5^\circ\text{C}.$$

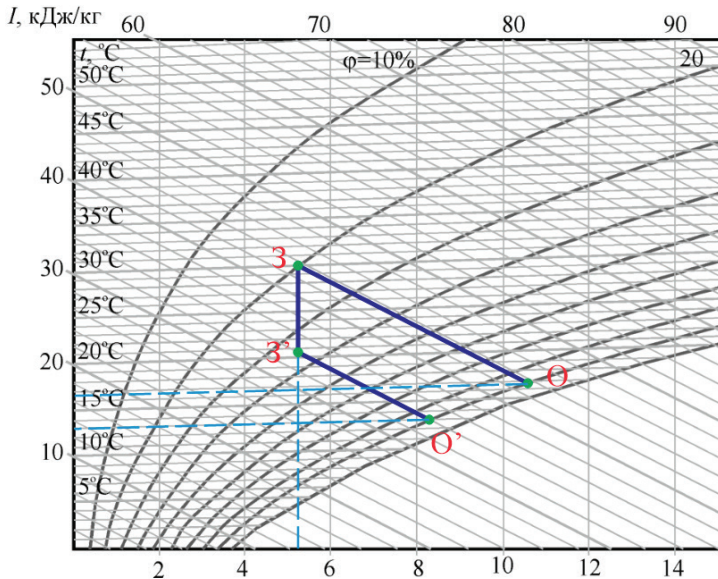


Рис. 24. Схеми охолодження повітря на $I-d$ -діаграмі

Точка З' знаходиться на перетині ліній температури $t_3 = 20,5^\circ\text{C}$ і вологомісту $d_3 = 5,2$ г/кг. Точка О знаходиться на перетині ліній ентальпії $I_3 = 34$ кДж/кг та вологості $\phi = 90\%$. Лінія ЗЗ'О' відповідає двоступеневому охолодженню повітря. Точка О' характеризує кінцевий стан повітря на виході з ЗКФ. Ізотерма т. О відповідає 13°C .

З прикладу видно, що при двоступеневому охолодженні параметри повітря ЗКФ нижче, ніж при прямому випарувальному процесі. Різниця по температурах $\Delta t_0 = 16,6 - 16 = 3,6^\circ\text{C}$; по ентальпії $\Delta I_0 = 43,5 - 34 = 9,5$ кДж/кг.

Розв'язати наступну задачу:

1. Визначити, до якої мінімальної температури можна охолодити зовнішнє повітря, застосовуючи двоступеневе охолодження та звичайне пряме ізоентальпійне охолодження. Зовнішнє повітря має наступні параметри: t_3, ϕ_3 .

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_3, ^\circ\text{C}$	32	34	30	32	34	30	32	34	30	32
$\phi_3, \%$	20	25	30	25	30	25	20	25	30	25

Контрольні питання

1. Розкрийте фізичну сутність двоступеневого охолодження повітря та його принципові відмінності від одноступеневого охолодження.
2. Які основні переваги двоступеневого охолодження повітря в системах кондиціювання?
3. Поясніть принцип роботи першого та другого ступенів охолодження в класичній схемі двоступеневого охолодження.
4. Як змінюються параметри повітря (температура, вологість) при проходженні через два ступені охолодження?

5. Охарактеризуйте технічні особливості обладнання, що використовується у двоступеневому охолодженні.
6. Які кліматичні умови та параметри припливного повітря є найбільш сприятливими для застосування двоступеневого охолодження?
7. Порівняйте енергетичну ефективність одно- та двоступеневого охолодження повітря.
8. Опишіть методику розрахунку процесу двоступеневого охолодження на $I-d$ -діаграмі вологого повітря.
9. Які основні недоліки та обмеження методу двоступеневого охолодження повітря?
10. Розкрийте галузі промисловості та типи приміщень, де найчастіше застосовується двоступеневе охолодження повітря.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 12.

Зволоження повітря водяною парою

При кондиціюванні повітря в деяких випадках використовують зволоження повітря гарячою парою.

Водяна пара звичайно має температуру більшу ніж 100°C , тобто таку, яка значно вища від температури повітря. Однак у зв'язку з тим, що вміст явної теплоти в парі, яка асимілюється повітрям, незначний, промінь процесу проходить з невеликим відхиленням верх від ізотерми. Зміна ентальпії повітря в основному визначається теплотою пароутворення водяної пари, температура повітря при цьому підвищується незначно (промінь $B_1B_2B_3$, рис. 25).

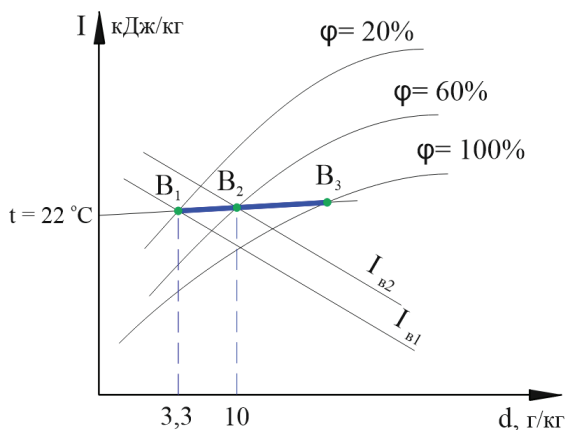


Рис. 25. Двоступеневе охолодження повітря

Значення кутового коефіцієнта визначається з рівняння:

$$\varepsilon = i_{\pi}, \quad (12.1)$$

де i_{π} – ентальпія водяної пари.

З деякими допущеннями можна вважати зволоження повітря водяною парою низьких параметрів ($p = 1$ атм, $t_{\pi} = 100^{\circ}\text{C}$) ізотермічним процесом.

Витрата водяної пари на зволоження повітря визначається з рівняння:

$$D = G(d_2 - d_1) \cdot 10^{-3}, \quad (12.2)$$

або

$$D = \frac{G(I_2 - I_1)}{I_{\pi}}. \quad (12.3)$$

Приклади розв'язання задач

1. Повітря з наступними параметрами $t_1 = 22^{\circ}\text{C}$, $\phi_1 = 20\%$ зволожується водяною парою до вологості $\phi_2 = 60\%$. Визначити витрату пари, якщо її тиск складає 1 атм (101325 Па). Витрата повітря 10000 кг/год.

Розв'язання

Зобразимо на I - d -діаграмі точку В1, яка відповідає початковому стану повітря (рис. 25). Ентальпія пари при $p = 1$ атм дорівнює $I_{\pi} = 2676$ кДж/кг. Відповідно кутовий коефіцієнт $\varepsilon = 2676$ кДж/кг.

Через т. В1 проводимо промінь процесу. На перетині променя процесу з вологістю $\phi_2 = 60\%$ відмічаємо т. В2, яка відповідає кінцевому стану повітря. Пряма В1В2 відповідає процесу зволоження повітря водяною парою. По I - d -діаграмі

визначаємо вологовміст і ентальпію повітря до та після зволоження:

$$d_{в1} = 3,3 \text{ г/кг}, d_{в2} = 10 \text{ г/кг}, \\ I_{в1} = 30,1 \text{ кДж/кг}, I_{в2} = 48,0 \text{ кДж/кг}.$$

Витрата водяної пари на зволоження повітря:

$$D = G(d_2 - d_1) \cdot 10^{-3} = 10000(10 - 3,3) \cdot 10^{-3} = 67 \text{ кг/год}$$

або

$$D = \frac{G(I_2 - I_1)}{I_{п}} = 2676 \approx 67 \text{ кг/год}.$$

Контрольні питання

1. Поясніть фізичну сутність процесу зволоження повітря водяною парою та його значення в системах кондиціонування.
2. Охарактеризуйте основні методи зволоження повітря водяною парою, їх переваги та недоліки.
3. Розкрийте принцип роботи парового зволожувача та його основні конструктивні елементи.
4. Як впливає процес зволоження водяною парою на температуру та вологість повітря в приміщенні?
5. Опишіть методику розрахунку параметрів повітря після зволоження на i - d -діаграмі вологого повітря.
6. Які гігієнічні вимоги та норми необхідно враховувати при зволоженні повітря водяною парою?
7. Порівняйте ефективність різних способів зволоження повітря: паровий, форсунковий, адіабатичний.
8. Поясніть принцип дії електродних та каналізаційних парових зволожувачів.
9. Які фактори впливають на вибір типу зволожувача для конкретних умов експлуатації?
10. Розкрийте особливості застосування зволоження водяною парою в різних галузях: харчова промисловість, медицина, текстильне виробництво, офісні приміщення.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиця 1. Фізичні характеристики деяких робочих тіл

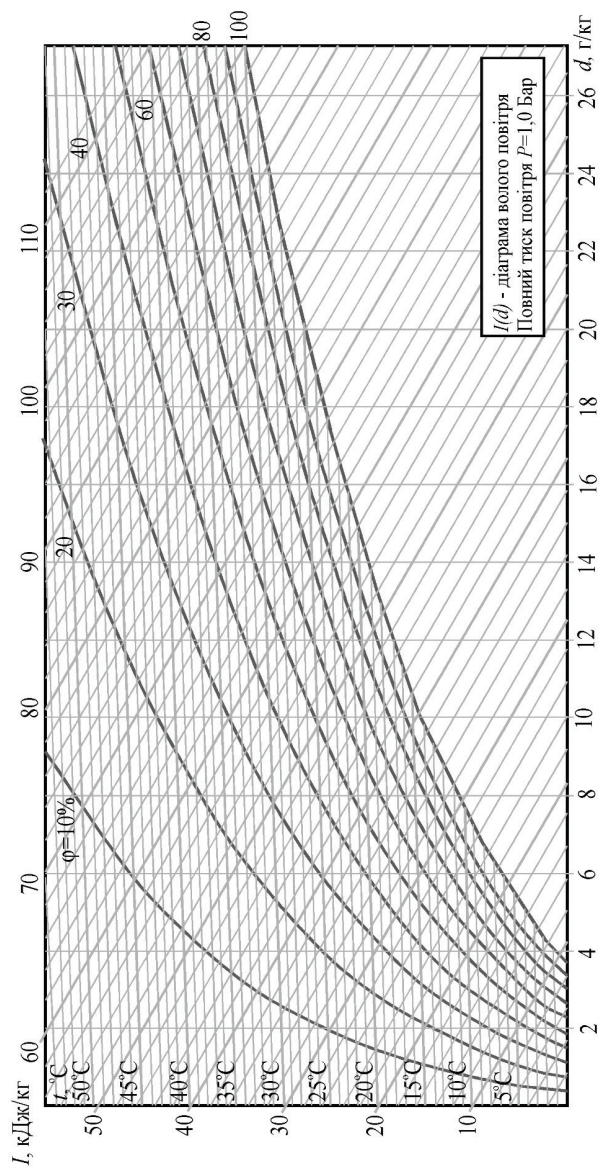
Газ	Хімічна формула	μ , кг/кмоль	R , Дж/(кг·К)	ρH , кг/м ³
Водень	H ₂	2,02	4124	0,090
Метан	CH ₄	16	517,8	0,717
Аміак	NH ₃	17,03	488	0,770
Водяна пара	H ₂ O	18,04	462	0,804
Окис вуглецю	CO	28,00	297	1,250
Азот	N ₂	28,01	297	1,250
Етилен	C ₂ H ₄	28,05	296,4	1,261
Повітря		28,97	287	1,290
Етан	C ₂ H ₆	30,07	276,5	1,355
Кисень	O ₂	31,99	260	1,430
Аргон	Ar	39,94	208	1,780
Пропілен	C ₃ H ₆	42,08	197,6	1,913
Двоокис вуглецю	CO ₂	44,01	189	2,980
Пропан	C ₃ H ₈	44,10	188,5	2,010
Бутилен	C ₄ H ₈	56,11	148,17	2,597
Сірчистий газ	SO ₂	64,07	130	2,926

Таблиця 2. Інтерполяційні формули для істинних і середніх мольних теплоємностей газів

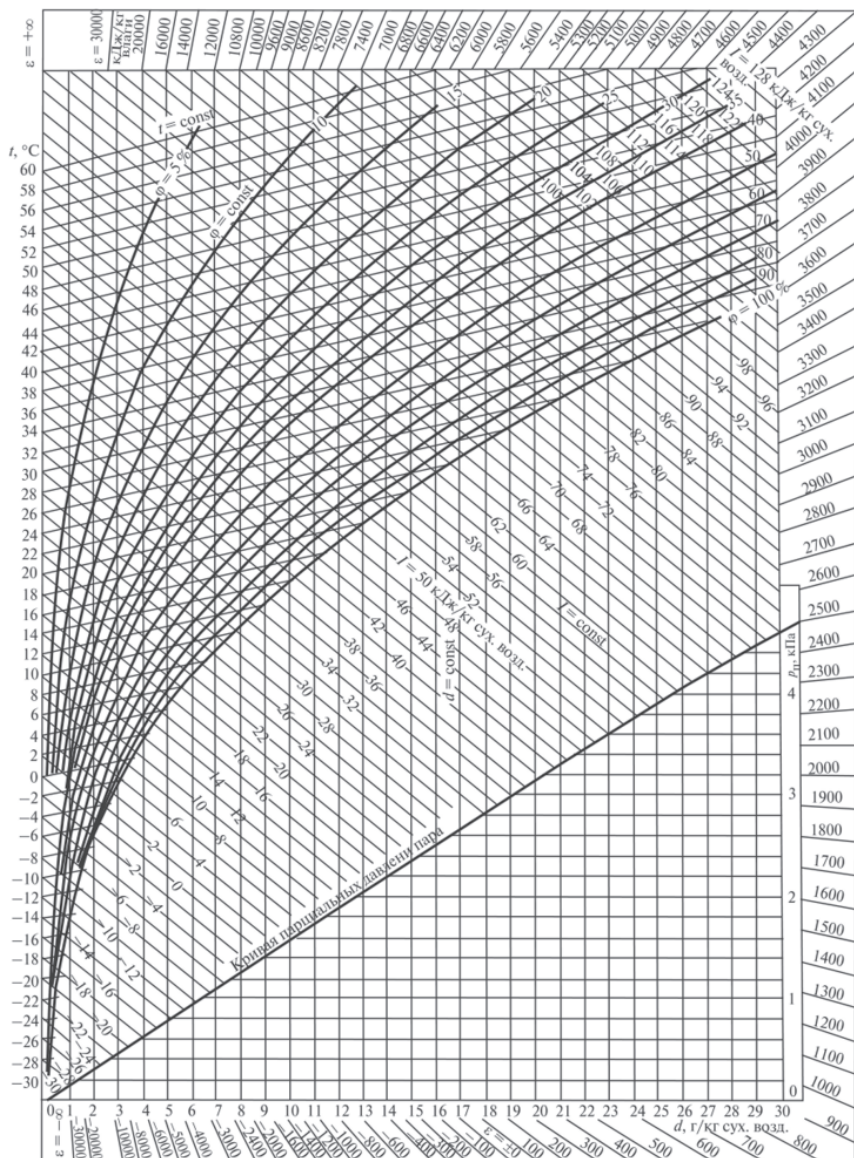
Газ	Істинна мольна теплоємність при $p = \text{const}$ μc_p , кДж/(кмоль·К)	Середня мольна теплоємність при $p = \text{const}$ μc_{pm} , кДж/(кмоль·К)
У межах від 0 до 1000 °С		
O ₂	$29,5802 + 0,0069706 \cdot t$	$29,2080 + 0,0040717 \cdot t$
N ₂	$28,5372 + 0,0053905 \cdot t$	$28,7340 + 0,0023488 \cdot t$
CO	$28,7395 + 0,0058862 \cdot t$	$28,8563 + 0,0026808 \cdot t$
Повітря	$28,7558 + 0,0057208 \cdot t$	$28,8270 + 0,0027080 \cdot t$
H ₂ O	$32,8367 + 0,0116611 \cdot t$	$33,1494 + 0,0052749 \cdot t$
SO	$42,8728 + 0,0132043 \cdot t$	$40,4386 + 0,0099562 \cdot t$
У межах від 0 до 1500 °С		
H ₂	$28,3446 + 0,0031518 \cdot t$	$28,7210 + 0,0012008 \cdot t$
CO ₂	$41,3597 + 0,0144985 \cdot t$	$38,3955 + 0,0105838 \cdot t$
У межах від 1000 до 2700 °С		
O ₂	$33,8603 + 0,0219510 \cdot t$	$31,5731 + 0,0017572 \cdot t$
N ₂	$32,7466 + 0,0016517 \cdot t$	$29,7815 + 0,0016835 \cdot t$
CO	$33,6991 + 0,0013406 \cdot t$	$30,4242 + 0,0015579 \cdot t$
Повітря	$32,9564 + 0,0017806 \cdot t$	$30,1533 + 0,0016973 \cdot t$
H ₂ O	$40,2393 + 0,0059854 \cdot t$	$34,5118 + 0,0045979 \cdot t$
У межах від 1500 до 3000 °С		
H ₂	$31,0079 + 0,0020243 \cdot t$	$28,6344 + 0,0014821 \cdot t$
CO ₂	$56,8768 + 0,0021738 \cdot t$	$48,4534 + 0,0030032 \cdot t$

Таблиця 3. Інтерполяційні формули для середніх масових та об'ємних теплоємностей газів

Газ	Середня масова теплоємність c_{pm} при $p = \text{const}$ c_{vm} при $v = \text{const}$ кДж/(кг·К)	Середня об'ємна теплоємність c'_{pm} при $p = \text{const}$ c'_{vm} при $v = \text{const}$ кДж/(м ³ ·К)
У межах від 0 до 1000 °С		
O ₂	$0,9127 + 0,00012724 \cdot t$ $0,6527 + 0,00012724 \cdot t$	$1,3046 + 0,00018183 \cdot t$ $0,9337 + 0,00018183 \cdot t$
N ₂	$1,0258 + 0,00008382 \cdot t$ $0,7289 + 0,00008382 \cdot t$	$1,2833 + 0,00010492 \cdot t$ $0,9123 + 0,00010492 \cdot t$
CO	$1,0304 + 0,00009575 \cdot t$ $0,7335 + 0,00009575 \cdot t$	$1,2883 + 0,00011966 \cdot t$ $0,9173 + 0,00011966 \cdot t$
Повітря	$0,9952 + 0,00009349 \cdot t$ $0,7084 + 0,00009349 \cdot t$	$1,2870 + 0,00012091 \cdot t$ $0,9161 + 0,00012091 \cdot t$
H ₂ O	$1,8401 + 0,00029278 \cdot t$ $1,3783 + 0,00029278 \cdot t$	$1,4800 + 0,00023551 \cdot t$ $1,1091 + 0,00023551 \cdot t$
SO	$0,6314 + 0,00015541 \cdot t$ $0,5016 + 0,00015541 \cdot t$	$1,8472 + 0,00004547 \cdot t$ $1,4763 + 0,00004547 \cdot t$
У межах від 0 до 1500 °С		
H ₂	$14,2494 + 0,00059574 \cdot t$ $10,1241 + 0,00059574 \cdot t$	$1,2803 + 0,00005355 \cdot t$ $0,9094 + 0,00005355 \cdot t$
CO ₂	$0,8725 + 0,00024053 \cdot t$ $0,6837 + 0,00024053 \cdot t$	$1,7250 + 0,00004756 \cdot t$ $1,3540 + 0,00004756 \cdot t$



I - d -діаграма вологого повітря



I-d-діаграма вологого повітря

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / М. Ф. Боженко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 380 с.

2. Тарасенко Ю. А. Температурний комфорт у будинках. Київ : ООО Сименс, 2007. 7 с.

3. Теплотехніка та енергетичні машини. Розрахунок системи кондиціонування : розрахункова робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. В. Дубровська, В. І. Шкляр. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 56 с.

4. Джеджула В. В. Вентиляція та кондиціонування громадських об'єктів: навчальний посібник / В. В. Джеджула. Вінниця : ВНТУ, 2021. 71 с.

5. Мельник О. Є. Основи кондиціонування повітря : метод. рекомендації до вивч. дисц. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, каф. загальноінженерних дисциплін та обладнання. Кривий Ріг : [ДонНУЕТ], 2020. 48 с.

6. Конспект лекцій по дисципліні «Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 144 – Теплоенергетика / укл. Р. О. Клімов. Кам'янське : ДДТУ, 2016. 102 с.

7. Братута Е. Г. та ін. Кондиціонування та вентиляція повітря : текст лекцій / Е. Г. Братута, А. М. Ганжа, О. В. Круглякова, В. В. Чубарова. Харків : НТУ «ХПІ», 2009. 128 с.

8. Довгалюк В. Б. Аеродинаміка вентиляції : навчальний посібник / В. Б. Довгалюк. Київ : ІВНВКП «Укрґеліотех», 2015. 368 с.

9. ДСТУ Б EN 15251:2011. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Чинні від 2013-01-01. Київ : Укрархбудінформ, 2012. 71 с.

10. Державні будівельні норми України. Опалення, вентиляція та кондиціювання. ДБН В.2.5-67: 2013.

11. Аверкін А. Р. Приклади та завдання з курсу «Кондиціювання повітря та холодопостачання». 2-е видання. М. : Вид-во Асоціації будівельних ВНЗ, 2003. 125 с.

12. Німіч Г. В., Михайлов В. А., Бондар Є. С. Сучасні системи вентиляції та кондиціювання повітря. Київ : ІВІК, 2003. 626 с.

13. Липа А. І. Кондиціювання повітря. Основи теорії. Сучасні технології обробки повітря. Одеса, 2010. 607 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Практичне заняття № 1.	
Основні властивості вологого повітря.....	4
Практичне заняття № 2.	
<i>I-d</i> -діаграма вологого повітря.....	7
Практичне заняття № 3.	
Процеси нагрівання, охолодження та змішування повітря.....	12
Практичне заняття № 4.	
Тепло- та вологообмін між повітрям та водою	19
Практичне заняття № 5.	
Розрахунки при побудові процесів СКП на <i>I-d</i> -діаграмі вологого повітря. Побудова променя процесу.....	24
Практичне заняття № 6.	
Побудова процесів обробки повітря в СКП при прямоточних схемах. Пряме ізоентальпійне охолодження повітря.....	33
Практичне заняття № 7.	
Прямоточна схема СКП для теплого періоду.....	39
Практичне заняття № 8.	
Прямоточна схема СКП для холодного періоду.....	45
Практичне заняття № 9.	
Побудова процесів обробки повітря в СКП з рециркуляцією. Схема СКП з першою рециркуляцією для теплого періоду.....	51

Практичне заняття № 10.

Схема СКП з першою рециркуляцією для холодного періоду.....	58
--	----

Практичне заняття № 11.

Двоступеневе охолодження повітря.....	65
---------------------------------------	----

Практичне заняття № 12.

Зволоження повітря водяною парою.....	70
---------------------------------------	----

Додатки	73
----------------------	----

Додаток 1.....	73
----------------	----

Додаток 2.....	76
----------------	----

Рекомендована література	78
---------------------------------------	----

Навчальне видання

КОБАЛАВА Галина Олександрівна
КАЛІНІЧЕНКО Іван Володимирович

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни
«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОНДИЦІОНУВАННЯ»

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
галузі знань 14 «Електрична інженерія»
спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»
(освітня програма «Холодильні машини і установки»)

Комп'ютерне верстання *Н. М. Ковальчук*
Коректор *О. Є. Вакула*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 4,77. Вид. № 1. Зам. № 1104-19.
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007
E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідectво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.