

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсового проекту
з дисципліни

ВЕНТИЛЯЦІЯ

Розділ

**«Властивості вологого повітря і зображення процесів
обробки повітря на I-d діаграмі»**

*(для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання і слухачів другої вищої
освіти напряму підготовки 0921 (6.060101) “Будівництво”,
спеціальності 7.092108, 7.06010107 “Теплогазопостачання і вентиляція”)*

Харків
ХНАМГ
2012

Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Вентиляція» Розділ «Властивості вологого повітря і зображення процесів обробки повітря на J-d діаграмі» (для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання і слухачів другої вищої освіти напряму підготовки 0921 (6.060101) “Будівництво”, спеціальності 7.092108, 7.06010107 “Теплогазопостачання і вентиляція”) / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О. С. Пранцуз. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 75 с.

Укладач: О. С. Пранцуз

Рецензент: доц., к.т.н. О. В. Ромашко

Методичні вказівки розроблені за вимогами кредитно-модульної системи організації навчального процесу та узгоджені з орієнтовною структурою змісту навчальної дисципліни, рекомендованою Європейською Кредитно-Трансферною Системою (ECTS).

Рекомендовано для студентів будівельних спеціальностей.

Затверджено на засіданні кафедри експлуатації газових і теплових систем, протокол № 10 від 27.10.2010 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІКИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ.....	5
1.1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ.....	5
1.2 ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ.....	7
1.3 ВЛАСТИВОСТІ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ.....	11
2. СУХЕ ПОВІТРЯ.....	14
3. ВОДА І ВОДЯНА ПАРА.....	16
3.1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	16
3.2 ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ВОДИ І ВОДЯНОЇ ПАРИ.....	17
4. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ.....	22
5. J - d – ДІАГРАМА ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ.....	38
5.1 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ J - d – ДІАГРАМИ.....	38
5.2 КУТОВИЙ КОЕФІЦІЄНТ ПРОМЕНЯ ПРОЦЕСУ НА J - d ДІАГРАМІ....	39
5.3 ПОБУДОВА ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ СТАНУ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ НА J - d – ДІАГРАМІ.....	47
5.3.1 Нагрівання й охолодження вологого повітря в поверхневих теплообмінниках.....	47
5.3.2 Зміна стану ненасиченого вологого повітря при контакті з водою.....	50
5.3.3 Зволоження вологого повітря паром.....	53
5.3.4 Осушення повітря адсорбентами.....	54
5.3.5 Осушення повітря абсорбентами.....	56
5.3.6 Процеси змішування різних мас повітря з різними параметрам....	58
5.3.7 Зміна стану повітря у приміщеннях і з тепло- та волого виділеннями.....	60
6. УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ВЕЛИЧИНИ.....	63
Список джерел.....	65
Додаток 1 Тиск насиченої водної пари над поверхнею льоду ($t < 0$) і чистої води ($t > 0$), кПа.....	65
Додаток 2 Вологовміст насиченого вологого повітря за барометричного тиску 99 кПа.....	68
Додаток 3 Вологовміст насиченого вологого повітря за барометричного тиску 101 кПа.....	70
Додаток 4 J - d – діаграма вологого повітря.....	72

ПЕРЕДМОВА

В методичних вказівках викладені основні закони термодинаміки ідеальних газів і сумішей, що використовуються в техніці вентиляції і кондиціонування повітря, надані визначення основних параметрів вологого повітря і розрахункові залежності для їх обчислення з прикладами розрахунків. Детально розглянута побудова процесів тепловологостної обробки вологого повітря на J-d діаграмі. Наведені таблиці значень тиску насиченої водяної пари над поверхнею льоду і чистої води, а також значень вологовмісту насиченого вологого повітря при барометричному тиску 99 і 101 кПа.

У методичних вказівках в додатках дано J-d - діаграми вологого повітря для інтервалу температур від -40 до $+60$ °C і значення вологовмісту до 30 г/кг сухого повітря при барометричному тиску 99 і 101 кПа. При побудові J-d -діаграм масштаби J і d вибрані так, щоб отримати широке робоче поле для побудови процесів зміни параметрів вологого повітря, що найбільш характерне для систем вентиляції і кондиціонування повітря житлових, цивільних і промислових споруд.

У методичних вказівках використані деякі розрахункові залежності й табличні матеріали з довідника ASHRAE.

Методичні вказівки призначені для студентів 3-4 курсів всіх форм навчання за фахом “Теплогазопостачання та вентиляція” і можуть бути корисними при вивченні таких дисциплін, як «Аеродинаміка вентиляції», «Вентиляція», «Кондиціонування повітря».

1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІКИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

1.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Термодинамічною системою називається сукупність матеріальних тіл в обмеженій області простору, що є об'єктом вивчення і взаємодіють з довкіллям.

Система відмежована від зовнішнього середовища матеріальною або уявною поверхнею – **кордоном системи**, яка може бути закритою, тобто непроникною для речовини, або відкритою, якщо кордон системи проникний для речовини.

Якщо кордон системи непроникний для речовини і не допускає обміну з довкіллям як теплотою, так і роботою, то така термодинамічна система називається **ізолюваною**.

Система називається **неізолюваною**, якщо вона допускає обмін із зовнішнім середовищем і теплотою, і роботою.

Система, що має у всіх своїх частинах однорідний склад і фізичні властивості, називається **однорідною**.

Однорідна термодинамічна система, усередині якої немає поверхні розподілу фаз, називається **гомогенною**.

Система, що складається з двох або більше фаз, називається **гетерогенною**.

Прикладом гомогенної системи є атмосферне повітря, що складається з суміші різних газів і водяної пари, а гетерогенної системи - туман, коли поряд з газовою фазою в системі присутня рідка (зважені краплі води) або тверда (кристали льоду) фаза.

Термодинамічна система описується низкою термодинамічних величин, що характеризують її властивості.

При стійкому стані системи ці величини називаються **параметрами стану**.

Внутрішні параметри характеризують внутрішній стан системи, до них належать тиск, температура, об'єм і ін.

Зовнішні параметри визначають положення системи (її координати) в зовнішніх силових полях і її швидкість.

Внутрішні параметри поділяються на **інтенсивні й екстенсивні**. Інтенсивні - це ті параметри, величина яких не залежить від розмірів або маси системи, наприклад, тиск, температура, питомий об'єм, питома теплоємність.

Параметри стану, значення яких визначаються сумою параметрів стану складників умовно розділеної системи, називаються екстенсивними. Прикладом екстенсивних параметрів стану є об'єм і маса.

Для характеристики конкретних умов, в яких функціонує дана система, або процесу, що відбувається в системі, зазвичай необхідно знати такі інтенсивні параметри стану, як питомий об'єм, тиск, абсолютна температура.

Питомий об'єм v – це співвідношення об'єму до його маси, тобто об'єм одиниці маси:

$$v = \frac{V}{m}, \quad (1.1)$$

де V – об'єм, який займає система, м^3 ;

m – маса речовини системи, кг

Маса речовини в одиниці об'єму, або величина, обернена питомому об'єму, називається **густиною** (ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$)

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}. \quad (1.2)$$

Тиск – це співвідношення нормальної складової сили, що діє на задану поверхню, до площі цієї поверхні (P , $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$):

$$P = \frac{F_{\text{н}}}{S}, \quad (1.3)$$

де $F_{\text{н}}$ – нормальна складова сили, Н ;

S – площа поверхні, нормальної до сили, що діє, м^2 .

Температура (T , K) – величина, що характеризує міру нагрівання тіла. Вона є вимірником середньої кінетичної енергії поступальної ходи молекул.

Сьогодні використовують температурну шкалу Цельсія і термодинамічну шкалу температур, засновану на другому законі термодинаміки. Між температурами, вираженими в Кельвінах і градусах Цельсія, є наступне співвідношення:

$$T, K = 273,15 + t^{\circ}\text{C}. \quad (1.4)$$

Слід зазначимо, що параметром стану є абсолютна температура, виражена в Кельвінах, але градус абсолютної шкали чисельно дорівнює градусу шкали Цельсія, отже $dT = dt$.

Стан термодинамічної системи може бути рівноважним і нерівноважним. **Рівноважним** називають такий стан системи, при якому в усіх точках її об'єму всі параметри стану і фізичні властивості однакові (тиск, температура, питомий об'єм та ін.), іншими словами, система знаходиться в **термодинамічній рівновазі**, якщо при ізоляції її від дії зовнішнього середовища параметри стану системи не змінюються.

1.2. ІДЕАЛЬНИЙ ГАЗ

Проста гомогенна система в рівноважному стані характеризується певними значеннями параметрів стану v , P і T . Рівняння, що встановлює зв'язок між тиском, температурою і питомим об'ємом системи, називається **термічним рівнянням стану** і має вигляд:

$$F(R, v, T) = 0. \quad (1.5)$$

Стан системи сповна визначається завданням двох з вказаних параметрів, оскільки будь-який з трьох параметрів є для кожного рівноважного стану однозначною функцією двох заданих. Тому можна записати, що

$$P = f_1(v, T); v = f_2(R, T); T = f_3(v, P).$$

Термічне рівняння стану газів при малому тиску приймає просте вираження. Якщо за вимірними значеннями R , v і T розрахувати величину $P \cdot v / T$, то отримаємо

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{P \cdot v}{T} = \text{const} = R_T. \quad (1.6)$$

Константа R_T називається **газовою постійною** і має для кожного газу своє значення. Вона є роботою 1 кг газу при постійному тиску і при зміні температури на 1 градус. Використовуючи поняття газової постійної, рівняння стану можна записати у вигляді

$$Pv = R_T T. \quad (1.7)$$

Газ, стан якого точно описується рівнянням (1.7), називається ідеальним, а саме рівняння — **термічним рівнянням стану ідеальних газів**, або рівнянням Клапейрона.

Для m кг ідеального газу рівняння стану має вигляд:

$$PV = mR_T T, \quad (1.8)$$

де V – об'єм газу, м^3 .

Помноживши обидві частини рівняння (1.8) на молекулярну масу μ , отримаємо

$$PV_\mu = \mu R_T T, \quad (1.9)$$

де $V_\mu = v \cdot \mu$ – об'єм, який займає один моль газу.

Молем або **кіломолем** називається кількість газу, маса якого в кілограмах чисельно дорівнює його молекулярній масі.

Множення $\mu R_T = R$ називається **універсальною газовою постійною**. Її значення за нормальних умов для 1 кмоль будь-якого газу дорівнює 8314,41 Дж/(кмоль·К).

Кожен ідеальний газ характеризується також питомою теплоємністю. **Теплоємністю** називається кількість теплоти, яку потрібно підвести до газу або відняти від нього для зміни температури газу на 1 °С. Під питомою **теплоємністю газу** розуміють співвідношення теплоти, отриманою одиницею кількості речовини при нескінченно малій зміні його стану, до зміни

температури.

Теплоємність є функцією процесу і не входить до числа термодинамічних параметрів.

Розрізняють масову і об'ємну теплоємності.

Теплоємність, співвіднесена до 1 кг газу, називають **питомою масовою** і позначають c , Дж/кг·К.

Теплоємність, співвіднесена до 1 м³ газу, за нормальних фізичних умов називають **питомою об'ємною** і позначають c' , Дж/м³·К.

Між вказаними питомими теплоємностями існує залежність

$$c = c'v_0,$$

де V_0 - питомий об'єм газу за нормальних умов.

Теплоємність, співвіднесена до 1 кмоль газу, називають **питомою молярною** і позначають $c_\mu = \mu \cdot c$, кДж/(кмоль·К).

Теплоємність залежить від характеру процесу. У термодинаміці велике значення мають питома теплоємність при постійному об'ємі c_v (**ізохорна теплоємність**), що дорівнює відношенню кількості теплоти до зміни температури газу в процесі при постійному об'ємі, а питома теплоємність при постійному тиску c_p (**ізобарна теплоємність**) дорівнює відношенню кількості теплоти до зміни температури газу в процесі при постійному тиску.

Для ідеального газу зв'язок між ізобарною й ізохорною теплоємностями визначається рівнянням Майєра:

$$c_p - c_v = R,$$

або

$$\mu c_p - \mu c_v = R = 8314,41, \text{ Дж/(кмоль·К)}.$$

Питомі теплоємності ідеальних газів c_p і c_v в загальному випадку є складними функціями температури, тому в розрахунках використовують середні значення питомих теплоємностей, зазвичай задані в табличній формі для певних значень температур. Середньою питомою теплоємністю даного процесу в інтервалі температур від t_1 до t_2 називають співвідношення кількості теплоти, переданої в процесі, до кінцевої різниці температур $t_1 - t_2$. Методика

визначення середніх значень c_p та c_v і приклади розрахунку наведені в [2].

З першого закону термодинаміки випливає, що теплота, підведена до робочого тіла, витрачається на зміну внутрішньої енергії і на виконання роботи.

Внутрішня енергія — це енергія, ув'язнена в системі. Вона складається з кінетичної енергії, обертального і коливального руху молекул, потенційної енергії взаємодії молекул, енергії внутрішньоатомних і внутрішньоядерних рухів часток та ін.

Внутрішня енергія є однозначною функцією внутрішніх параметрів стану (температури, тиск) і складу системи.

Для спрощення розрахунків термодинамічних процесів У. Гиббсом введена функція J для m кг маси, яку називають **ентальпією**, i для 1 кг маси **питомою ентальпією**.

Ентальпія J належить до екстенсивних параметрів, оскільки її величина пропорційна масі.

Питома ентальпія i є складною функцією і може бути виражена формулою:

$$i = u + Pv,$$

де u - питома внутрішня енергія газу.

Оскільки величини u , P і v є параметрами стану, то і сама питома ентальпія також буде параметром стану.

Фізичний сенс ентальпії полягає в тому, що в ізобарних процесах зміна ентальпії дорівнює кількості теплоти, поглиненої або відданої системою.

Питома ентальпія ідеального газу, як і внутрішня енергія, є функцією лише температури і не залежить від об'єму і тиску.

У термодинаміці не потрібне знання абсолютного значення ентальпії, тому відлік починають від деякого умовного нуля. Для ідеального газу прийнято вважати ентальпію такою, що дорівнює нулю при температурі $t_0 = 0$ °С.

Приріст ентальпії для будь-якого процесу зміни стану ідеального газу в межах однієї фази (газоподібної, рідкої або твердої) визначається за формулою:

$$\Delta i_{1-2} = i_2 - i_1 = \bar{c}_p (T_2 - T_1).$$

Якщо вважати, що $i_{t=0} = 0$, то ентальпія газу при температурі t

$$i = \bar{c}_p \cdot t, \text{ кДж/кг.} \quad (1.10)$$

Формула (1.10) показує, що питома ентальпія ідеального газу чисельно дорівнює кількості теплоти, яка підведена до 1 кг газу при нагріванні його від 0°C до температури $t^\circ\text{C}$ при постійному тиску.

1.3. ВЛАСТИВОСТІ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

Під **газовою сумішшю** розуміють механічну суміш окремих газів, що не вступають між собою ні в які хімічні реакції. Кожен газ в суміші, незалежно від інших газів, повністю зберігає свої властивості та поводить ся так, якби він один займав весь об'єм суміші.

Всі реальні гази в діапазоні температур, характерному для систем кондиціонування повітря, і атмосферного або близького до нього тиску повністю лічать під поняття ідеального газу, тому кожен окремий газ, що входить в суміш, вважається ідеальним газом.

Оскільки суміш складається з декількох компонентів, то її стан не може бути визначений лише двома параметрами, і необхідні додаткові величини, що характеризують склад суміші.

Зазвичай склад суміші ідеальних газів задають масовими частками g_i , тобто співвідношенням маси компонента суміші m_i до маси всієї суміші $m_{\text{см}}$

$$g_1 = \frac{m_1}{m_{\text{см}}}; g_2 = \frac{m_2}{m_{\text{см}}}; \dots g_n = \frac{m_n}{m_{\text{см}}}.$$

При цьому $m_1 + m_2 + \dots + m_n = m_{\text{см}}; g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1$.

Інколи склад суміші задають об'ємними частками r_i , тобто співвідношенням парціального об'єму компонента V_i до об'єму суміші $V_{\text{см}}$:

$$r_1 = \frac{V_1}{V_{\text{см}}}; r_2 = \frac{V_2}{V_{\text{см}}}; \dots r_n = \frac{V_n}{V_{\text{см}}}.$$

При цьому

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = V_{\text{см}};$$

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

Під **парціальним об'ємом газу** розуміють об'єм, який займав би цей газ, якби його температура і тиск відповідали температурі та тиску суміші.

Співвідношення між масовими і об'ємними концентраціями мають вигляд

$$g_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{см}}} \cdot r_i = \frac{V_{\text{см}}}{V_i} \cdot r_i = \frac{\mu_n}{\mu_{\text{см}}} \cdot r_i = \frac{R_{\text{см}}}{R_i} \cdot r_i ,$$

або

$$r_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{см}}} \cdot g_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} \cdot g_i = \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_n} \cdot g_i = \frac{R_i}{R_{\text{см}}} \cdot g_i .$$

За **законом Дальтона**, загальний тиск ідеальних газів $P_{\text{см}}$ дорівнює сумі парціального тиску окремих газів P_i , що входять до складу суміші

$$P_{\text{см}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_1^n P_i . \quad (1.11)$$

Під **парціальним тиском** розуміють такий тиск, який мав би газ суміші, якби він входив до її складу тієї ж кількості, в тому ж об'ємі та при тій же температурі, що і в суміші.

Для окремих компонентів і для суміші в цілому можна використати рівняння Клапейрона:

$$P_i V_{\text{см}} = m_i R_i T_{\text{см}}; \quad (1.12)$$

$$P_{\text{см}} V_{\text{см}} = m_{\text{см}} R_{\text{см}} T_{\text{см}}. \quad (1.13)$$

Якщо підсумувати рівняння (1.12) за всіма компонентами, то отримаємо

$$V_{\text{см}} \sum_1^n P_i = T_{\text{см}} \sum_1^n m_i P_i . \quad (1.14)$$

Згідно із законом Дальтона (1.11), ліві частини рівнянь (1.12) і (1.13) рівні, отже, рівні і праві. Тоді, можна отримати наступний вираз для газової постійної суміші:

$$R_{\text{см}} = \sum_1^n g_i P_i . \quad (1.15)$$

Або, якщо заданий об'ємний склад суміші, то

$$R_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{r_i}{R_i}}. \quad (1.16)$$

Поняття універсальної газової постійної поширюється і на суміші

$$\mu_1 R_1 = \mu_2 R_2 = \dots = \mu_n R_n = \mu_{\text{см}} R_{\text{см}} = 8314,41 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Якщо відома величина газової постійної суміші, то **середня молекулярна маса**, що є умовною величиною та належить до такого умовно однорідного газу, в якому число молекул і загальна маса дорівнюють числу молекул і масі суміші газів, визначається з виразу:

$$\mu_{\text{см}} = \frac{8314,41}{R_{\text{см}}}. \quad (1.17)$$

Парціальний тиск газу в суміші можна визначити:

- через масові частки – з рівняння Клапейрона

$$P_i = \frac{m_i \cdot R_i \cdot T_{\text{см}}}{V_{\text{см}}} = P_{\text{см}} \cdot g_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} = P_{\text{см}} \cdot g_i \frac{\mu_{\text{см}}}{\mu_i}. \quad (1.18)$$

- через об'ємні частки – із закону Бойля-Маріотта

$$P_i = P_{\text{см}} \frac{V_i}{V_{\text{см}}} = r_i \cdot P_{\text{см}}. \quad (1.19)$$

Значення питомих теплоємностей газових сумішей визначаються за наступними формулами:

- суміш газів задана масовими частками

$$c_{v_{\text{см}}} = g_1 \cdot c_{v_1} + g_2 \cdot c_{v_2} + \dots + g_n \cdot c_{v_n} = \sum_1^n g_i c_{v_i}; \quad (1.20)$$

$$c_{p_{\text{см}}} = g_1 \cdot c_{p_1} + g_2 \cdot c_{p_2} + \dots + g_n \cdot c_{p_n} = \sum_1^n g_i c_{p_i}; \quad (1.21)$$

- суміш газів задана об'ємними частками

$$c'_{v_{\text{см}}} = r_1 \cdot c'_{v_1} + r_2 \cdot c'_{v_2} + \dots + r_n \cdot c'_{v_n} = \sum_1^n r_i c'_{v_i}; \quad (1.22)$$

$$c'_{\rho_{\text{см}}} = r_1 \cdot c'_{\rho_1} + r_2 \cdot c'_{\rho_2} + \dots + r_n \cdot c'_{\rho_n} = \sum_1^n g_i c'_{\rho_i} .$$

Адитивність об'єму і внутрішньої енергії ідеальної газової суміші зумовлює ці властивості для ентальпії суміші

$$J_{\text{см}} = J_1 + J_2 + \dots + J_n = \sum_1^n J_i .$$

Тоді для питомих величин ентальпії

$$i_{\text{см}} = g_1 \cdot i_1 + g_2 \cdot i_2 + \dots + g_n \cdot i_n = \sum_1^n g_i i_i . \quad (1.23)$$

2. СУХЕ ПОВІТРЯ

Атмосферним повітрям є суміш газів, що не взаємодіють між собою, водяної пари і різних забрудників (дим, пил, промислові, транспортні й інші газові викиди).

Суміш газів, що містяться в атмосферному повітрі, без водяної пари і забрудників називається **сухим повітрям**.

Склад сухого повітря відносно стабільний (таблиця. 1), проте, залежно від пори року, географічного положення, висоти місцевості та погоди, можливі невеликі зміни кількості деяких компонентів.

Таблиця 1 – Склад сухої частини атмосферного повітря

Найменування компонента	Хімічне позначення	Вміст за об'ємом, %
Азот	N ₂	78,084
Кисень	O ₂	20,9476
Аргон	Ar	0,934
Вуглекислий газ	CO ₂	0,0314
Неон	Ne	0,001818
Гелій	He	0,000524
Метан	CH ₄	0,00015
Водень	H ₂	0,00005
Двоокис сірки	SO ₂	от 0 до 0,0001
Озон	O ₃	1·10 ⁻⁶
Криптон	Kr	1·10 ⁻⁴
Ксенон	Xe	8·10 ⁻⁶
Радон	Rn	6·10 ⁻¹⁸

Завданням розрахунку газових сумішей, в т.ч. і сухого повітря, є визначення газової постійної, молекулярної маси, густини та питомого об'єму, питомих теплоємностей та інших величин на основі заданого складу суміші.

Для сухого повітря вказані величини визначають на основі рівнянь і співвідношень для ідеального газу.

Мольна маса газів, що входять до складу сухого повітря, за шкалою вуглецю-12 дорівнює 28,9645 кг/кмоль.

Газова постійна для сухого повітря R_c може бути визначена за формулою:

$$R_c = \frac{R}{\mu_c} = \frac{8314,41}{28,9645} = 287,055 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad (2.1)$$

де R —універсальна газова постійна, Дж/кмоль·К;

μ_c — мольна маса сухого повітря, кг/кмоль.

Густина сухого повітря ρ_c в кг/м³ та його питомий об'єм можна визначити з рівняння Клапейрона

$$\rho_c = \frac{P_c}{R_c \cdot T_c} = 3,483 \frac{P_c}{T_c}, \quad (2.2)$$

де P_c —тиск сухого повітря, кПа;

T_c — температура сухого повітря, К.

Питомі масові теплоємності сухого повітря $c_{p,c}$ і $c_{v,c}$ залежать від температури. Значення середньої питомої теплоємності при постійному тиску сухого повітря 101,325 кПа для певного інтервалу температур наведені нижче в табл. 2.

З табл. 2 видно, що в інтервалі температур від – 40 до + 60 °С питому теплоємність сухого повітря при постійному тиску можна вважати постійною:

$$c_{p,c} = 1,006 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Масова питома теплоємність при постійному об'ємі може бути визначена за формулою Майєра

$$c_{v,c} = c_{p,c} - R_c = 1,006 - 0,2871 = 0,7189 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Питому ентальпію сухого повітря кДж/кг при різних температурах можна визначити за формулою (1.10):

$$i_c = c_{p,c} \cdot t = 1,006t. \quad (2.3)$$

3. ВОДА І ВОДЯНА ПАРА

3.1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Вода, як і будь-яка інша речовина, може знаходитися в твердому (лід), рідкому (вода) і газоподібному (пара) станах, а залежно від співвідношення тиску і температури – одночасно в двох і навіть в трьох станах.

Таким чином, вода може бути гомогенною системою (лід, вода, пара) і гетерогенною системою (пара-вода, вода-лід, пара-лід, пара-вода-лід).

Кожна гомогенна частина гетерогенної системи, що обмежена поверхнею розподілу і що характеризується однаковими фізичними властивостями у всіх своїх точках, називається **фазою**.

Фазовим переходом називається процес, що супроводжується витратою теплоти і зміною об'єму, в якому відбувається зміна агрегатного стану речовини. Перехід речовини з однієї фази в іншу відбувається через поверхню розподілу фаз.

Перехід речовини з твердого стану в рідкий називають **плавленням**, з твердого в газоподібний – **сублімацією**, з рідкого в газоподібний – **паротворенням**. Зворотні процеси, відповідно, називають **твердінням**, **десублімацією** і **конденсацією**.

У свою чергу, процес пароутворення реалізується у вигляді випару і кипіння.

Випаром називається пароутворення, яке відбувається лише з поверхні рідини. **Кипіння** — процес перетворення рідини в пару, який відбувається не лише з поверхні рідини, але і усередині неї, тобто це процес пароутворення у всій масі рідини.

Газоподібна фаза води, залежно від температури і тиску, може бути у вигляді сухої насиченої, перегрітої і вологої насиченої пари.

Суха насичена пара – це пара, що знаходиться в рівноважному стані з рідиною на межі розподілу фаз, не містить часток рідкої фази.

Якщо до сухої насиченої пари підводити теплоту, то її температура

зростатиме і пара стає **перегрітою**. Різниця між температурою перегрітої пари і температурою сухої насиченої пари називається ступенем перегрівання.

Перегріта пара не насиченою. При даному тиску його густина менше густини сухої ненасиченої пари, а питомий об'єм більший.

Волога пара є гетерогенною системою, яка може бути дво– або трифазною.

Таблиця 2

Інтервал температур, °C	-40...-21	-20...-1	0...19	20...29	30...39	40...49	50...59
Значення $c_{p,c}$, кДж/(кг·К)	1,0057	1,0058	1,006	1,0061	1,0063	1,0064	1,0066

При температурі вище 0°C і тиску більше 0,61 кПа (для плоскої поверхні розподілу фаз) волога пара складається з водяної пари і води; при температурі 0°C і тиску 0,61 кПа волога пара складається з водяної пари, води і льоду, а при температурі нижче 0°C і тиску менше 0,61 кПа – з водяної пари і льоду.

Вказані вище параметри характеризують **потрійну точку води**, якій відповідає тиск 0,61 кПа і температура 0,01°C. У потрійній точці внутрішня енергія, ентальпія і ентропія води умовно дорівнюють нулю.

3.2. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ ВОДИ І ВОДЯНОЇ ПАРИ

Вода, як і всі краплинні рідини, практично нестискувана. Тому для води, що не знаходиться в стані насичення, приймають питомий об'єм v_B , що дорівнює питомому об'єму в стані насичення v'_B .

Значення питомого об'єму води в стані насичення наведені в таблиці 3 [4].

Зміна питомого об'єму v'_B в діапазоні температур від 0 до 50 °C складає 1,2%. Тому для практичних розрахунків можна вважати питомий об'єм постійним, що дорівнює середньому значенню

$$v_B = v'_{B \text{ ср}} = \frac{0,0010002 + 0,0010121}{2} = 0,001006 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таблиця 3

Температура t , °C	Питомий об'єм $\nu'_в$, м³/кг	Температура t , °C	Питомий об'єм $\nu'_в$, м³/кг
0	0,0010002	40	0,0010078
5	0,0010000	45	0,0010099
10	0,0010003	50	0,0010121
15	0,0010008	60	0,0010171
20	0,0010017	70	0,0010228
25	0,0010029	80	0,0010292
30	0,0010043	90	0,0010361
35	0,0010060	100	0,0010437

В цьому випадку густина води $\rho_v = 994,04 \text{ кг/м}^3$.

Середні значення питомої масової теплоємності води в інтервалі температур від 0 до 100°C змінюються від 4,179 до 4,217 кДж/(кг·К) [4]. У розрахунках систем кондиціонування повітря

$$c_{\text{ср.в}} = 4,186 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Стан сухої ненасиченої пари визначається одним параметром - тиском насичення, який є функцією лише температури.

Тиск насиченої водяної пари над плоскою поверхнею води або льоду можна визначити за формулами 3.1 та 3.2 [3] або за допомогою таблиці додатка 1.

Для пружності водяної пари, що насичує, над поверхнею льоду при температурі від -100 до 0°C:

$$\ln(P_n) = \frac{C_1}{T} = C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 T^4 + C_7 \ln T, \quad (3.1)$$

де P_n —тиск насиченої водяної пари над поверхнею льоду, Па;

$T = t + 273,15$ – абсолютна температура за шкалою Кельвіна;

$$C_1 = -5,6745359 \cdot 10^3;$$

$$C_2 = 6,3925247;$$

$$C_3 = -9,677843 \cdot 10^{-3};$$

$$C_4 = 6,2215701 \cdot 10^{-7};$$

$$C_5 = 2,0747825 \cdot 10^{-9};$$

$$C_6 = -9,484024 \cdot 10^{-13};$$

$$C_7 = 4,1635019.$$

Для пружності водяної пари, що насичує, над поверхнею чистої води при температурі від 0 до 200 °С:

$$\ln(P_{\text{н}}) = \frac{C_8}{T} = C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13}\ln T, \quad (3.2)$$

$$\text{де } C_8 = -5,8002206 \cdot 10^3;$$

$$C_9 = 1,3914993;$$

$$C_{10} = -4,8640239 \cdot 10^{-2};$$

$$C_{11} = 4,1764768 \cdot 10^{-5};$$

$$C_{12} = -1,4452093 \cdot 10^{-8};$$

$$C_{13} = 6,5459673.$$

Для інженерних розрахунків зручнішими є формули, запропоновані в роботі [7].

Для пружності водяної пари, що насичує, над поверхнею льоду при температурі від -60 до 0°С:

$$P_{\text{н}} = \exp \frac{18,74t - 115,72}{233,77 + 0,881t}. \quad (3.3)$$

Для пружності водяної пари, що насичує, над поверхнею чистої води при температурі від 0 до 83 °С:

$$P_{\text{н}} = \exp \frac{16,57t - 115,72}{233,77 + 0,997t}. \quad (3.4)$$

Слід зазначити, що в інтервалі температур від -5 до -60 °С значення $P_{\text{н}}$, отримані за формулою (3.3), відрізняються від табличних в межах від 0 до 0,00046 кПа. У інтервалі температур від 0 до 43 °С максимальна різниця між значеннями $P_{\text{н}}$, отриманими за формулою (3.4), і табличними не перевищує 0,0017 кПа.

Молярна маса води і водяної пари за шкалою вуглецю -12 дорівнює

$$\mu_{\text{п}} = 18,01528 \text{ кг/кмоль.}$$

Значення газової постійної для водяної пари

$$R_{\text{п}} = \frac{8314,41}{18,01528} = 461,520 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Суша насичена пара при значеннях температури і тиску, характерних для систем кондиціонування повітря, трохи відхиляється від поведінки ідеального газу, що дозволяє використовувати рівняння Клапейрона для визначення питомого об'єму і густини пари. Наприклад, при $t = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ тиск насичення $P_{\text{п}} = 611,2 \text{ Па}$, тоді:

$$v''_{\text{п}} = \frac{461,52 \cdot 273,15}{611,2} = 206,26 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\rho_{\text{п}} = 0,00485 \text{ кг/м}^3.$$

Експериментальні табличні значення для насиченої водяної пари в інтервалі температур від -60 до 160°C наведені в [3], а для умов кондиціонування повітря – в табл. 4.

Значення середньої питомої теплоємності насиченої водяної пари при постійному тиску за даними [4] наведені в табл. 5.

Для діапазону температур від -50 до $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ питому теплоємність насиченої водяної пари прийнято вважати постійною, що дорівнює

$$c_{\text{рп}} = 1,86 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Питома ентальпія сухої насиченої водяної пари $i_{\text{п}}$ при $t_{\text{н}} > 0^{\circ}\text{C}$ визначається за формулою

$$i_{\text{п}} = i_{\text{в}} + r = c_{\text{рв}} \cdot t_{\text{н}} + r, \quad (3.5)$$

де $i_{\text{в}}$ – ентальпія киплячої води, кДж/кг;

$c_{\text{рв}}$ – питома масова теплоємність води, кДж/(кг·К);

r – питома теплота пароутворення, кДж/кг.

Питомаю теплотою пароутворення називається кількість теплоти, що витрачається на перетворення на пару 1 кг води, нагрітої до температури кипіння.

Питома теплота пароутворення r є функцією температури насичення і для діапазону температур від 0 до $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ добре апроксимується лінійною

залежністю

$$r = 2501 - 2,36t_n. \quad (3.6)$$

У табл. 6 наведені значення r за даними [4] і за формулою 3.6.

При температурі $t_n < 0$ °С питома ентальпія сухої насиченої пари визначається за формулою

$$i_n = c_{рл} - r_{пл0} + r_{суб}, \quad (3.7)$$

де $c_{рл}$ - питома масова теплоємність льоду, кДж/(кг·К);

$r_{пл0} = 334,11$ кДж/кг – питома теплота плавлення льоду при $t_n = 0$ °С;

$r_{суб}$ – питома теплота сублімації льоду, кДж/кг.

Експериментальні значення питомої ентальпії сухої насиченої водяної пари в інтервалі температур від -60 до 160°С наведені в [3].

Значення питомої ентальпії перегрітої водяної пари визначається рівнянням

$$i_{пп} = i_{нп} + c_{рп} (t_p - t_n), \quad (3.8)$$

де $i_{нп}$ – питома ентальпія насиченої водяної пари, кДж/кг;

$c_{рп} = 1,86$ кДж/(кг·К) –питома середня теплоємність перегрітої пари;

Таблиця 4 – Питомий об'єм та густина насиченої водяної пари

Температура t , °С	Тиск насичення P_n , Па	Питомий об'єм v_n'' , м³/кг		Густина $\rho_{нп}$, кг/м³ за табл. [3]
		Табл. [3]	за рівнянням Клапейрона	
-50	3,94	26145,0	26139,0	0,0000382
-40	12,85	8376,3	8373,8	0,0001194
-30	38,02	2951,6	2951,6	0,000339
-20	103,26	1131,3	1131,4	0,000884
-10	259,9	467,14	467,29	0,002141
0	611,2	206,14	206,26	0,004851
5	872,5	147,03	147,13	0,00680
10	1228,0	106,33	106,42	0,00940
15	1705,5	77,898	77,98	0,01284
20	2338,8	57,773	57,85	0,01731
25	3169,2	43,351	43,42	0,02307
30	4246,0	32,889	32,95	0,03041
35	5627,8	25,213	25,27	0,03966
40	7383,5	19,521	19,58	0,05123
45	9593,2	15,256	15,31	0,06555
50	12349,9	12,029	12,08	0,08313

Таблиця 5

Температура t , °C	0	10	20	30	40	50	60
Питома теплоємність $c_{рп}$, кДж/(кг·К)	1,864	1,868	1,874	1,883	1,894	1,907	1,924

$t_{п}$ та $t_{н}$ – температура перегрітої і насиченої пари відповідно, °C.

4. ВОЛОГЕ ПОВІТРЯ

У термодинаміці атмосферне повітря розглядають як суміш, що складається з сухого повітря і водяної пари, яка може бути в перегрітому, насиченому або в сконденсованому зваженому стані у вигляді краплинного або крижаного (при мінусовій температурі) туману.

Останній стан є нестійким і вивчається зазвичай при вирішенні деяких спеціальних завдань, наприклад, в холодильній техніці.

При розрахунках систем вентиляції і кондиціонування атмосферне повітря вважають бінарною гомогенною сумішшю, до складу якої входять сухе повітря і водяна пара.

Суміш сухого повітря з перегрітою водяною парою називається **ненасиченим вологим повітрям**, а суміш сухого повітря з насиченою водяною парою – **насиченим вологим повітрям**. При цьому умова насичення розглядається як рівноважний стан між водяною парою у вологому повітрі та водою в рідкій або твердій фазах при однаковій температурі на плоскій поверхні розподілу.

Кількість водяної пари у вологому повітрі змінюється від нуля (сухе повітря) до деякого максимального значення, яке залежить від температури і барометричного тиску, і в процесах кондиціонування зазвичай не перевищує 3 ... 4%.

Таблиця 6

Температура t_n , °C	Питома теплота пароутворення r , кДж/кг		Похибка, %
	За даними [4]	За формулою 3.6	
0	2501	2501	0
1	2498,6	2498,6	0
2	2496,3	2496,3	0
3	2493,9	2493,9	0
5	2489,2	2489,2	0
10	2477,4	2477,4	0
15	2465,7	2465,6	0,004
20	2453,8	2453,8	0
25	2442,0	2442,0	0
30	2430,2	2430,2	0
35	2418,4	2418,4	0
40	2406,5	2406,6	0,004
45	2394,5	2394,8	0,013
50	2382,5	2383,0	0,021
55	2370,5	2371,2	0,03
60	2358,4	2359,4	0,06

Тому з достатньою для технічних розрахунків точністю вологе повітря можна вважати ідеальним газом, який підкоряється всім законам суміші ідеальних газів, хоча у деяких випадках необхідно враховувати реальні властивості водяної пари.

Термодинамічні властивості сухого повітря і водяної пари різні, тому властивості вологого повітря залежать від його кількісного складу.

У техніці вентиляції і кондиціонування властивості вологого повітря характеризуються наступними основними параметрами:

Температура, виміряна сухим термометром t ,
 вологовміст d ,
 відносна вологість ϕ ,
 густина ρ ,
 температура, що виміряна мокрим термометром t_m ,
 температура точки роси t_p ,
 барометричний тиск P_b ,
 питома теплоємність c

питома ентальпія J , (які позначення використовуються в сфері кондиціонуванні повітря).

Згідно із законом Дальтона, барометричний тиск вологого повітря дорівнює сумі парціальних тисків сухого повітря і водяної пари

$$P_6 = P_c + P_n. \quad (4.1)$$

Величини P_6 , P_c і P_n вимірюють в Па або кПа.

Температура і барометричний тиск атмосферного повітря залежать від висоти над рівнем моря, географічного розташування і погодних умов. На рівні моря як стандартні прийняті [3]: температура 15 °С і барометричний тиск 101,325 кПа. Значення температури і барометричного тиску для стандартної атмосфери на висоті від –500 до 20000 м можна обчислити за формулами [3]:

$$P_6 = 101,325 \cdot (1 - 2,25577 \cdot 10^{-5} \cdot Z)^{5,2559}; \quad (4.2)$$

$$t = 15 - 0,0065 \cdot Z, \quad (4.3)$$

де Z — висота над рівнем моря, м;

P_6 – барометричний тиск, кПа;

t – температура повітря, °С.

Парціальний тиск сухого повітря і водяної пари, що входять до складу вологого повітря, можна визначити в Па за рівнянням Клапейрона:

$$P_c = \frac{M_c \cdot R_c \cdot T}{V}; \quad (4.4)$$

$$P_n = \frac{M_n \cdot R_n \cdot T}{V}, \quad (4.5)$$

де M_c – маса сухої частини вологого повітря;

M_n – маса водяної пари у вологому повітрі;

V – загальний об'єм суміші;

T – абсолютна температура суміші, К.

При тепловологій обробці та зміні властивостей вологого повітря кількість його сухої частини залишається незмінною, тому при розгляді тепловологого стану повітря прийнято його показники застосовувати до 1 кг сухої частини.

Маса водяної пари у вологому повітрі, що припадає на 1 кг маси сухої його частини, називається **вологівмістом вологого повітря**:

$$d = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{с}}}, \frac{\text{г}}{\text{кг с.в.}} \quad (4.6)$$

Для $(1 + d)$ кг вологого повітря, тобто для суміші, що містить 1 кг сухого повітря і d кг водяної пари, рівняння стану мають вигляд:

$$P_{\text{с}} \cdot V = R_{\text{с}} \cdot T; \quad (4.7)$$

$$P_{\text{п}} \cdot V = \frac{d}{1000} \cdot R_{\text{п}} \cdot T. \quad (4.8)$$

Розділивши перше рівняння на друге і підставивши значення $R_{\text{с}}$ та $R_{\text{п}}$, отримаємо

$$d = 622 \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}} = 622 \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{б}} - P_{\text{с}}}, \frac{\text{г}}{\text{кг с.в.}} \quad (4.9)$$

З рівняння (4.9) можна отримати залежність:

$$P_{\text{п}} = \frac{P_{\text{б}} \cdot d}{622 + d} \quad (4.10)$$

Як видно, парціальний тиск водяної пари в ненасиченому вологому повітрі при певному барометричному тиску однозначно визначається вологовмістом і не залежить від температури.

Відносною вологістю повітря називається відношення парціального тиску водяної пари, що міститься у вологому повітрі заданого стану, до парціального тиску насиченої водяної пари при тій самій температурі:

$$\varphi = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}} \cdot 100\% \quad (4.11)$$

Тиск насиченої водяної пари над поверхнею води або льоду $P_{\text{н}}$ відрізняється від тиску водяної пари в насиченому вологому повітрі $P_{\text{п.н}}$ при тій самій температурі. Це пов'язано з тим, що у присутності інертного газу, яким є сухе повітря, рівноважний тиск водяної пари над вільною поверхнею води залежить не лише від температури, але і від загального тиску вологого повітря. Оскільки на воду впливає додатковий тиск сухого повітря, то повинен

збільшитися тиск насиченої водяної пари у вологому повітрі. Проте питомий об'єм водяної пари значно більше питомого об'єму води, і якщо тиск рідкої фази зростає пропорційно збільшенню тиску повітря, то тиск насиченої водяної пари змінюється незначною мірою.

У загальному випадку тиск насиченої водяної пари в багатокомпонентній системі (наприклад, в атмосферному повітрі) можна розрахувати за формулою:

$$P_{п.н} = P_n \cdot \chi, \quad (4.12)$$

де χ – функція, що коректує, залежить від складу сухої частини парогазової суміші, її загального тиску, температури й агрегатного стану води.

Значення функції χ подано в дод. 6 [1].

У діапазоні температури від -40 до +50 °С і тиску 100 кПа відносна погрішність при визначенні тиску насиченої водяної пари в повітрі без врахування коефіцієнта (%) носить систематичний характер і не перевищує 0,55%.

Тому при розрахунках систем кондиціювання повітря можна вважати, що $P_{п.н} = P_n$.

Питома ентальпія вологого повітря зазвичай використовується у вигляді рівняння (1.10), тому в техніці кондиціювання загальноприйнятим є наступне визначення: **питома ентальпія вологого повітря J** – це кількість теплоти, що міститься у вологому повітрі при заданій температурі й тиску, віднесене до 1 кг сухого повітря.

Ентальпія суміші газів дорівнює сумі ентальпій компонентів, що входять у суміш. Отже, питома ентальпія вологого повітря представляє суму ентальпій сухого повітря і водяної пари.

$$J = J_c + J_{п} - d, \quad (4.13)$$

де J_c – питома ентальпія сухого повітря, кДж/кг с.в.;

$J_{п}$ – питома ентальпія водяної пари, кДж/кг п.

З врахуванням залежностей 2.3 і 3.5 формули для розрахунку ентальпії вологого повітря мають вигляд:

- для ненасиченого повітря

$$J = c_c \cdot t + (r + c_{rp} \cdot t) \frac{d}{1000}; \quad (4.14)$$

- для насиченого повітря

$$J_n = c_c \cdot t_n + (r + c_{rp} \cdot t_n) \frac{d_n}{1000} \quad (4.15)$$

Для діапазону температур від -50 до +50 °C у роботі [2] запропонована залежність:

$$J = 1,006 \cdot t + (2500,64 + 1,86 \cdot t) \frac{d}{1000}, \text{ кДж/кг с.в.} \quad (4.16)$$

Точніші результати дає формула [3]:

$$J = 1,006 \cdot t + (2501 + 1,85 \cdot t) \frac{d}{1000}, \text{ кДж/кг с.в.} \quad (4.17)$$

За нульову точку прийнята ентальпія сухого повітря ($d = 0$) при температурі 0°C.

Рівняння (4.17) можна записати в наступному вигляді:

$$J = (1,006 + 1,805d) \cdot t + 2501d = c \cdot t + 2501d, \quad (4.18)$$

де $c = 1,006 + 1,805d$, кДж/(К·кг с.в.) є теплоємністю вологого повітря, віднесеною до 1 кг сухої його частини.

У ненасиченому вологому повітрі водяна пара знаходиться в перегрітому стані, тобто його температура вища за температуру насичення. Якщо вологе повітря охолоджувати без зміни тиску, то кількість водяної пари, що міститься в ньому, залишатиметься незмінною, отже, процес охолодження йтиме при постійному вологовмісті та парціальному тиску пари. Такий процес може протікати до тих пір, поки температура повітря і пари не знизиться до температури насичення, оскільки при подальшому охолодженні повітря з нього почне випадати волога у вигляді крапель або інею.

Температура, яка відповідає стану насичення вологого повітря при

заданому значенні вологовмісту або парціального тиску, називається **температурою точки роси**. Температура точки роси є граничною температурою, до якої можна охолоджувати вологе повітря при постійному вологовмісті без випадання конденсату.

Значення температури точки роси при відомому парціальному тиску можна визначити за додатком 1 або, з достатньою для інженерних розрахунків точністю, обчислити за формулами [7] :

–при температурі від 0 до -60°C

$$t_p = \frac{233,77 \ln P_n + 115,72}{18,74 - 0,881 \ln P_n} ; \quad (4.19)$$

–при температурі від 0 до 87°C

$$t_p = \frac{233,77 \ln P_n + 115,72}{16,57 - 0,997 \ln P_n} , \quad (4.20)$$

де t_p – температура точки роси, $^{\circ}\text{C}$;

P_n – парціальний тиск насиченої водяної пари, кПа.

Зазначимо, що в інтервалі температур від 5 до 87°C розрахункові значення t_p відрізняються від табличних не більш ніж на $0,02^{\circ}\text{C}$, а в інтервалі від 0 до -40°C – не більш ніж на $0,03^{\circ}\text{C}$.

Розглянемо замкнуту систему, в якій ненасичене вологе повітря контактує з відкритою поверхнею води.

Початкові параметри повітря: $t_1, J_1, d_1, P_{n1}, \varphi_1$.

Початкова температура води в піддоні $t_{p1} < t_{w1} < t_1$.

Система теплоізована від довкілля і не має втрат або надходжень тепла ззовні. Загальний тиск повітря в системі не змінюється.

Оскільки температура повітря не дорівнює температурі води, а парціальний тиск насиченої водяної пари над поверхнею води вищий, ніж в ненасиченому повітрі, то між повітрям і водою буде протікати процес тепло- і масообміну, спрямований у бік нижчого потенціалу, тобто випаровування води й охолодження повітря.

Процес продовжується до тих пір, поки не вийде на стаціонарний режим.

На випаровування води потрібне тепло (прихована теплота паротворення), яке спочатку поступає від повітря і води.

Проте через деякий час температура води досягне такого рівня, коли тепло, яке передається від повітря до води, урівноважиться з теплом, що витрачається на випар води, і її температура залишатиметься постійною, рівною t_m .

Оскільки система теплоізована від зовнішнього середовища, то далі в процесі тепло- і масообміну знижуватиметься лише температура повітря при одночасному збільшенні його вологовмісту та відносної вологості.

Зміна стану вологого повітря завершиться, коли його температура дорівнюватиме температурі води і повітря стане насиченим, тобто $t_2 = t_n = t_m$.

Процес насичення повітря, в якому відсутня взаємодія з довкіллям, у термодинаміці називають **процесом адіабатного насичення**.

У результаті такого процесу відбувається наступне:

- вологовміст вологого повітря збільшується від початкового d_1 до кінцевого d_n , що відповідає насиченню при температурі t_m ;
- ентальпія повітря зростає від J_1 до J_n , що відповідає насиченню при температурі t_m , за рахунок ентальпії води, що випарувалася, J_w .

При фіксованому значенні барометричного тиску значення J_n , d_n та J_w є функцією лише температури t_m , яку приймуть повітря і вода в результаті адіабатного процесу. Ця температура і є температурою мокрого термометра.

Температура мокрого термометра – це температура, яку приймає ненасичене вологе повітря з початковими параметрами J_1 і d_1 у результаті адіабатного тепло- і масообміну з водою в рідкому або твердому стані, що має постійну температуру $t_w = t_m$ після досягнення ним насиченого стану, що задовольняє рівність

$$J_n = J_1 + (d_n - d_1) \cdot c_w \cdot t_m, \quad (4.21)$$

де $c_w = 4,186$ – питома теплоємність води, кДж/кг·°С.

Різниця $J_n - J_1$ зазвичай невелика, тому процес адіабатного насичення часто називають ізоентальпійним, хоча насправді $J_n = J_1$ лише при $t_m = 0$.

Температуру мокрого термометра при відомих значеннях d_1 або J_1 і t_1 можна визначити за формулою:

$$J_1 = 1,006t_m + 2501d_h + (4,186d_1 - 2,381d_h) \cdot t_m, \text{ кДж/кг с.в.}; \quad (4.22)$$

$$d_1 = \frac{(2501 - 2,381t_m) \cdot d_h - 1,006(t_1 - t_m)}{2501 + 1,805t_1 - 4,186t_m}, \text{ кг/кг с.в.} \quad (4.23)$$

У рівняннях (4.22) і (4.23) по два невідомих (t_m і d_h), проте кожному значенню t_m при заданому барометричному тиску відповідає лише одне табличне значення d_h , тому рівняння легко розв'язуються методом послідовних наближень.

Для спрощення розрахунків в додатках 2 і 3 приведені значення вологовмісту насиченого вологого повітря при барометричному тиску 99 і 101 кПа.

Густина вологого повітря ρ_v у кг/м³ є відношенням маси вологого повітря до об'єму:

$$\rho_v = \frac{M_v}{V} = \frac{M_c}{V} + \frac{M_p}{V} \quad (4.24)$$

Значення ρ_v визначають:

$$\rho_v = 3,483 \frac{P_6}{T} - 1,317 \frac{P_p}{T}; \quad (4.25)$$

$$\rho_v = \frac{P_6(1+d)}{0,2871T(1+1,6078d)}, \quad (4.26)$$

де P_6 – барометричний тиск повітря, кПа;

P_p – парціальний тиск водяної пари, кПа;

d – вологовміст вологого повітря, кг/кг с.в.;

$T = t + 273,15$ – абсолютна температура повітря, К.

Питомий об'єм вологого повітря v_v прийнято визначати, відносячи об'єм вологого повітря V_v до маси сухого повітря M_c

$$v_v = \frac{V_v}{M_c} = \frac{1+d}{\rho_v} \quad (4.27)$$

Ця величина відрізняється від питомого об'єму v'_B , віднесеного до загальної маси вологого повітря:

$$v'_B = \frac{V_B}{M_c + M_n} = \frac{v_B}{1 + d} \quad (4.28)$$

Приведені вище розрахункові залежності, а також таблиця тиску насиченої водяної пари над поверхнею чистої води і льоду (додаток 1) і таблиці значень вологовмісту насиченого вологого повітря при барометричному тиску 99 і 101 кПа (додатки 2 і 3) дозволяють аналітично визначати необхідні параметри повітря при двох заданих.

Розглянемо порядок обчислень в прикладах 1.1 ... 1.4.

Приклад 1.1.

Дано: температура повітря за сухим термометром $t = 24^\circ\text{C}$; відносна вологість $\phi = 50\%$; барометричний тиск $P_6 = 99$ кПа.

Визначити: ентальпію J , вологовміст d , температуру точки роси t_p , температуру мокрого термометра t_m , парціальний тиск водяної пари P_n і густину вологого повітря ρ_v .

Розв'язання

1. За додатком 1 знаходимо значення парціального тиску насиченої водяної пари при $t = 24^\circ\text{C}$:

$$P_n = 2,9851 \text{ кПа.}$$

2. За формулою 4.11 визначаємо парціальний тиск водяної пари:

$$P_n = \phi \cdot P_n = 0,5 \cdot 2,9851 = 1,4926 \text{ кПа.}$$

3. За формулою 4.20 визначаємо значення температури точки роси:

$$t_p = \frac{233,77 \cdot \ln 1,4926 + 115,72}{16,57 - 0,97 \cdot \ln 1,4926} = 12,946^\circ\text{C} \text{ (за додатком 1, } t_p = 12,947^\circ\text{C).}$$

4. За формулою 4.9 обчислюємо значення вологовмісту:

$$d = 622 \frac{1,4926}{99 - 1,4926} = 9,521 \text{ г/кг с.в.}$$

5. Визначаємо значення питомої ентальпії за формулою 4.17:

$$J = 1,006 \cdot 24 + (2501 + 1,805 \cdot 24) \frac{9,521}{1000} = 48,368 \text{ кДж/кг с.в.}$$

6. Значення температури мокрого термометра визначаємо методом послідовних наближень. Для прискорення обчислень скористаємося наближеним вираженням:

$$t_m \approx \frac{J_1 - 2,5d_n}{1,015} = \frac{48,368 - 2,5d_n}{1,015} \quad (4.29)$$

Задаємося значеннями $t_m = 18^\circ\text{C}$ і $t_m = 17^\circ\text{C}$, по таблиці додатку 2 знаходимо значення

Задаємося значеннями $t_m = 18^\circ\text{C}$ і $t_m = 17^\circ\text{C}$, за таблицею додатка 2 знаходимо значення $d_{n(18)} = 13,2458 \text{ г/кг с.в.}$; $d_{n(17)} = 12,4189 \text{ г/кг с.в.}$

Обчислюємо:

$$t_m = \frac{48,368 - 2,5 \cdot 13,2458}{1,015} = 15,03 < 18^\circ\text{C};$$

$$t_m = \frac{48,368 - 2,5 \cdot 12,4189}{1,015} = 17,065 > 17^\circ\text{C}.$$

Задаємося значенням $t_m = 17,01^\circ\text{C}$; по прил. 2 знаходимо значення $d_n = 12,427 \text{ г/кг с.в.}$ і перевіряємо рівність по формулі 4.22:

Як видно, значення t_m дійсно знаходиться в інтервалі температур $17 \dots 18^\circ\text{C}$, причому дуже близько до 17°C .

Задаємося значенням $t_m = 17,01^\circ\text{C}$; за додатком 2 знаходимо значення $d_n = 12,427 \text{ г/кг с.в.}$ і перевіряємо рівність за формулою 4.22:

$$J_1 = 1,006 \cdot 17,01 + 2,501 \cdot 12,427 + (4,186 \cdot 9,521 - 2,381 \cdot 12,427) \cdot \frac{17,01}{1000} = 48,367 \text{ кДж/кг с.в.}$$

Отже, дійсно $t_m = 17,01^\circ\text{C}$.

7. За формулою 4.25 обчислюємо густину вологого повітря:

$$\rho_v = 3,483 \frac{99}{297,15} - 1,317 \frac{1,4926}{297,15} = 1,154 \text{ кг/м}^3$$

Приклад 1.2

Дано: температура повітря за сухим термометром $t = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$; питома ентальпія $J = 60\text{ кДж/кг с.в.}$; барометричний тиск $P_6 = 101\text{ кПа}$.

Визначити: відносну вологість ϕ , вологовміст d , температуру точки роси t_p , температуру мокрого термометра t_m , парціальний тиск водяної пари P_n і густину вологого повітря ρ_v .

Розв'язання

1. Використовуючи формулу 4.17, визначаємо значення d :

$$d = \frac{1000(J - 1,006t)}{2501 + 1,805t} = \frac{1000(60 - 1,006 \cdot 33)}{2501 + 1,805 \cdot 33} = 10,467\text{ г/кг с.в.}$$

2. За формулою 4.10 обчислюємо значення P_n :

$$P_n = \frac{101 \cdot 10,467}{622 + 10,467} = 1,671\text{ кПа.}$$

3. За додатком 1 знаходимо значення парціального тиску насиченої водяної пари при $t = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$P_n = 5,0343\text{ кПа}$$

4. За формулою 4.11 визначаємо відносну вологість повітря:

$$\phi = \frac{1,671}{5,0343} \cdot 100 \approx 33\%$$

5. За додатком 1 знаходимо значення температури точки роси при $P_n = 1,671\text{ кПа}$:

$$t_p = 14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$$

6. Методом послідовних наближень визначаємо температуру мокрого термометра. Задаємося значеннями $t_m = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_m = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$. За таблицею додатка 3 знаходимо значення

$$d_{n(20)} = 14,7448\text{ г/кг с.в.}; d_{n(21)} = 15,7070\text{ г/кг с.в.}$$

$$t_{m1} = \frac{60 - 2,5 \cdot 14,7448}{1,015} = 22,80 > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Обчислюємо за формулою 4.29:

$$t_{m2} = \frac{60 - 2,5 \cdot 15,7070}{1,015} = 20,43 < 21\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Значення t_m знаходиться в заданому інтервалі температур ближче до 21 °С. Задаємося значенням $t_m = 20,84$ °С, за додатком 3 знаходимо значення $d_n = 15,5494$ г/кг с.в. і перевіряємо рівність за формулою 4.22:

$$J_1 = 1,006 \cdot 20,84 + 2,501 \cdot 15,5494 + (4,186 \cdot 10,467 - 2,381 \cdot 15,5494) \cdot \frac{20,84}{1000} = 59,996 \approx 60 \text{ кДж/кг с.в.}$$

7. За формулою 4.25 визначаємо густину вологого повітря:

$$\rho_v = 3,483 \frac{101}{306,15} - 1,317 \frac{1,671}{306,15} = 1,142 \text{ кг/м}^3$$

Приклад 1.3.

Дано: температура мокрого термометра $t_m = 17$ °С; відносна вологість $\phi = 0\%$; барометричний тиск $P_6 = 99$ кПа.

Визначити: питому ентальпію J ; вологовміст d ; температуру повітря за сухим термометром t ; парціальний тиск водяної пари P_n і температуру точки роси t_p вологого повітря.

Розв'язання

У завдання є один з найбільш складних для розрахунку, оскільки немає аналітичних залежностей, що пов'язують два задані параметри.

1. За додатком 2 знаходимо значення вологовмісту насиченого повітря при $t_m = 17$ °С:

$$d_n = 12,4189 \text{ г/кг с.в.}$$

2. Обчислюємо значення ентальпії $J_{n(17 \text{ °С})}$:

$$J_n = 1,006 \cdot 17 + (2,501 + 1,805 \cdot 17) \cdot \frac{12,4189}{1000} = 48,5427 \text{ кДж/кг с.в.}$$

3. Обчислюємо значення ентальпії при $t_m = 17$ °С і $d = 0$ г/кг с.в.:

$$J_c = J_n - \frac{d_n \cdot 4,186 \cdot 17}{1000} = 47,6589 \text{ кДж/кг с.в.}$$

4. Значення ентальпії для шуканої точки знаходиться в інтервалі від 47,6589 до 48,5427 кДж/кг с.в.; d – від 0 до 12,4189 г/кг с.в.

5. Далі задачу розв'язуємо методом послідовних наближень. Задаємося значенням:

$$J_1 = \frac{47,6589 + 48,5427}{2} = 48,1 \text{ кДж/кг с.в.}$$

Обчислюємо значення d_1 за формулою, отриманою з формули 4.22:

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{J_1 - 1,006t_m - 2,501d_h + 0,002381d_h \cdot t_m}{0,004186t_m} = \\ &= \frac{48,1 - 1,006 \cdot 17 - 2,501 \cdot 12,4189 + 0,002381 \cdot 12,4189 \cdot 17}{0,004186 \cdot 17} = 6,197 \text{ г/кг с.в.} \end{aligned}$$

За формулою 4.10 обчислюємо значення:

$$P_{\Pi} = \frac{99 \cdot 6,197}{622 + 6,197} = 0,9766 \text{ кПа}$$

За формулою 4.11 визначаємо:

$$P_{\Pi, h} = \frac{0,9766}{0,2} = 4,8830 \text{ кПа}$$

За додатком 1 знаходимо відповідне значення температури: $t = 32,46^\circ\text{C}$.

Обчислюємо:

$$J_1 = 1,006 \cdot 32,46 + (2,501 + 1,805 \cdot 32,46) \frac{6,197}{1000} = 48,52 > 48,1$$

Задане значення J_1 трохи менше розрахункового, тому фактичні значення температури t_1 і вологовмісту d_1 мають бути трохи нижче.

Подальше наближення зручніше виконувати, використовуючи температуру сухого термометра.

Задаємося значенням: $t_1 = 32,24^\circ\text{C}$.

За додатком 1 знаходимо:

$$P_{\Pi, h} = 4,8235 \text{ кПа}$$

Обчислюємо:

$$P_{\Pi} = 4,8235 \cdot 0,2 = 0,9647 \text{ кПа};$$

$$d_1 = 622 \frac{0,9647}{99 - 0,9647} = 6,1207 \text{ г/кг с.в.}$$

$$J'_1 = 1,006 \cdot 32,24 + (2,501 + 1,805 \cdot 32,24) \frac{6,1207}{1000} = 48,097$$

Знаходимо значення J_1 за формулою 4.22:

$$J_1 = 1,006 \cdot 17 + 2,501 \cdot 12,41189 + (0,004186 \cdot 6,1207 - 0,002381 \cdot 12,4189) \cdot 17 = 48,095 \text{ кДж/кг с.в.}$$

Значення J'_1 і J_1 практично збіглися, тобто задане значення $t_1 = 32,24^\circ\text{C}$ є правильним, і остаточно отримуємо:

$$J_1 = 48,097 \text{ кДж/кг с.в.}; d_1 = 6,1207 \text{ г/кг с.в.}; P_{\text{п}} = 0,9647 \text{ кПа}; t_p = 6,45^\circ\text{C}.$$

Приклад 1.4

Дано: ентальпія внутрішнього повітря $J = 60$ кДж/кг с.в. відносна вологість $\phi = 50\%$; барометричний тиск $P_{\text{б}} = 99$ кПа.

Визначити: температури t , t_p , t_m ; вологовміст d і парціальний тиск водяної пари $P_{\text{п}}$.

Розв'язання

Справжнє завдання не має прямого рішення, оскільки у формулах для ϕ і J кількість невідомих більша, ніж число рівнянь. Тому завдання може бути вирішене лише методом послідовних наближень. Приведена у прикладі методика дозволяє вирішити завдання з найменшим обсягом обчислень.

1. Задаємося двома довільними значеннями вологовмісту. Чим ближчими ці значення виявляться від дійсної величини і чим менше буде різниця між ними, тим швидше буде вирішено завдання.

Приймаємо : $d_1 = 10$; $d_2 = 13$ г/кг с.в.

2. За формулами 4.10 і 4.11 обчислюємо відповідні значення парціального тиску водяної пари:

$$P_{\text{п1}} = \frac{99 \cdot 10}{622 + 10} = 1,5665 \text{ кПа}$$

$$P_{\text{п2}} = \frac{99 \cdot 13}{622 + 13} = 2,0268 \text{ кПа}$$

$$P_{\text{н1}} = 3,1330 \text{ кПа}; P_{\text{н2}} = 4,0536 \text{ кПа}$$

3. За додатком 1 знаходимо значення температури сухого термометра:

$$t_{н1} = 24,81 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{н2} = 29,19 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

4. Обчислюємо значення ентальпії:

$$J_1 = 1,006 \cdot 24,81 + (2,501 + 1,805 \cdot 24,81) \frac{10}{1000} = 50,4167 \text{ кДж/кг с.в.}$$

$$J_2 = 1,006 \cdot 29,19 + (2,501 + 1,805 \cdot 29,19) \frac{13}{1000} = 62,5631 \text{ кДж/кг с.в.}$$

Як видно, задане значення ентальпії знаходиться в інтервалі:

$$50,4167 < 60 < 62,5631.$$

5. За допомогою лінійної інтерполяції знаходимо наближене значення вологовмісту:

$$d' = 13 - \frac{(32,5631 - 60) \cdot (13 - 10)}{62,5631 - 50,4167} = 12,3669 \text{ г/кг с.в.}$$

6. З урахуванням нелінійної залежності ентальпії від вологовмісту приймаємо:

$$d = 12,345 \text{ г/кг с.в.}$$

і повторюємо обчислення за пунктами 2, 3 і 4:

$$P_{\pi} = \frac{99 \cdot 12,345}{622 + 12,345} = 1,9266 \text{ кПа};$$

$$P_{\pi.н} = 1,9266 \cdot 2 = 3,8533 \text{ кПа};$$

$$t = 28,32 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$J = 1,006 \cdot 28,32 + (2,501 + 1,805 \cdot 28,32) \frac{12,345}{1000} = 59,996 \text{ кДж/кг с.в.}$$

Значення ентальпії практично рівне заданому $J = 60$ кДж/кг с.в.

7. За додатком 1 знаходимо значення температури точки роси при $P_{\pi} = 1,9266$ кПа:

$$t_p = 16,9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

8. Значення t_m визначаємо методом послідовних наближень так само, як у прикладах 1.1 і 1.2, тому проміжні розрахунки не приводимо.

Задаємося $t_m = 20,57\text{ }^{\circ}\text{C}$; за додатком 2 знаходимо $d_n = 15,6031\text{ г/кг с.в.}$

Обчислюємо

$$J_1 = 1,006 \cdot 20,57 + 2,501 + 15,6031 + (4,186 \cdot 12,345 - 2,381 \cdot 15,6031) \frac{20,57}{1000} = 60,013 \approx 60\text{ кДж/кг с.в.}$$

Тобто $t_m = 20,57\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. $J-d$ – ДІАГРАМА ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ

5.1 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ $J-d$ – ДІАГРАМИ

Використовуючи систему рівнянь, що включає залежності 4.9, 4.11, 4.17, а також функційний зв'язок $P_n = f(t)$, Л. К. Рамзін побудував $J-d$ – діаграму вологого повітря, яка широко застосовується в розрахунках систем вентиляції та кондиціювання повітря. Ця діаграма є графічною залежністю між основними параметрами повітря t , ϕ , J , d і P_n при певному барометричному тиску повітря P_6 .

Побудова $J-d$ – діаграми детально описана в роботах [5, 6, 8].

Стан вологого повітря характеризується точкою, нанесеною на полі $J-d$ –діаграми, обмеженому лінією $d = 0$ і кривій $\phi = 100\%$.

Положення точки задається будь-якими двома параметрами з п'яти, вказаних вище, а також температурами точки роси t_p і мокрого термометра t_m . Виняток становлять поєднання $d - P_n$ і $d - t_p$, оскільки кожному значенню d відповідає лише одне табличне значення P_n і t_p , і поєднання $J - t_m$.

Схема визначення параметрів повітря для заданої крапки 1 приведена на рис. 1. Користуючись $J-d$ – діаграмою за додатком 4 і схемою на рис. 1, розв'яжемо конкретні приклади для всіх 17 можливих поєднань заданих початкових параметрів повітря, конкретні значення яких вказані в таблиці 7.

Схеми розв'язань і отримані результати показані на мал. 2.1 ... 2.17. Відомі параметри повітря виділені на рисунках потовщеними лініями.

5.2. КУТОВИЙ КОЕФІЦІЄНТ ПРОМЕНЯ ПРОЦЕСУ НА $J-d$ – ДІАГРАМІ

Можливість швидкого графічного визначення параметрів вологого повітря є важливим, але не основним чинником при використанні $J-d$ – діаграми.

У результаті нагрівання, охолодження, осушення або зволоження вологого повітря змінюється його стан тепло-вологості. Процеси зміни зображаються на $J-d$ – діаграмі прямими лініями, які сполучають точки, що характеризують початкові та кінцеві стани повітря.

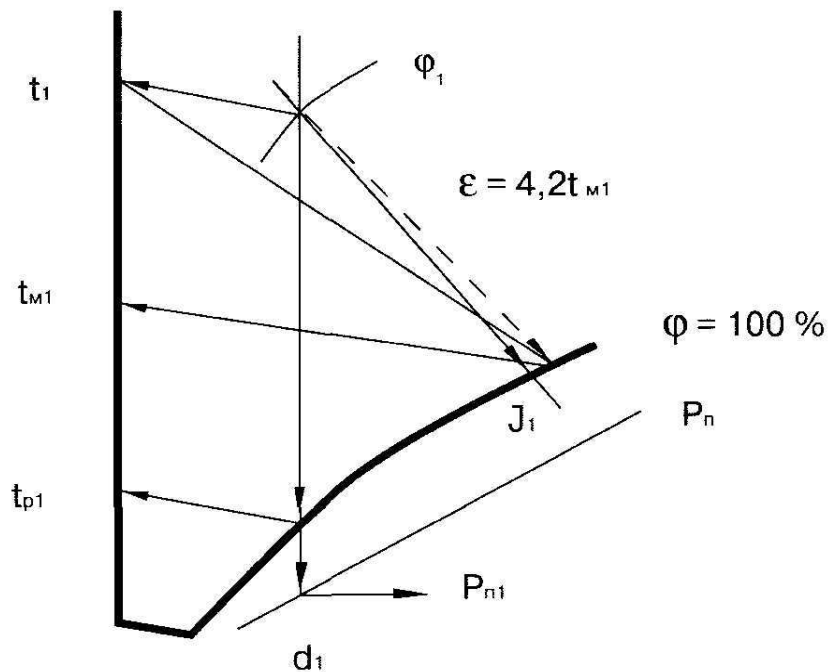


Рис. 1 – Схема визначення параметрів вологого повітря на $J-d$ діаграмі

Таблиця 7

Номер рисунку	Відомі параметри повітря						
	$t_1, ^\circ\text{C}$	$\varphi_1, \%$	$d_1, \text{г/кг с.в.}$	$J_1, \text{кДж/кг с.в.}$	$P_{п1}, \text{кПа}$	$t_{p1}, ^\circ\text{C}$	$t_{м1}, ^\circ\text{C}$
2.1	30	50	-	-	-	-	-
2.2	32	-	-	-	-	12	-
2.3	24	-	10	-	-	-	-
2.4	28	-	-	-	2,0	-	-
2.5	26	-	-	38	-	-	-
2.6	33	-	-	-	-	-	20
2.7	-	25	-	-	1,6	-	-
2.8	-	50	-	60	-	-	-
2.9	-	-	8	64	-	-	-
2.10	-	-	-	-	-	10	22
2.11	-	30	15	-	-	-	-
2.12	-	-	-	-	2,2	-	24
2.13	-	25	-	-	-	14	-
2.14	-	55	-	-	-	-	20
2.15	-	-	9	-	-	-	23
2.16	-	-	-	62	1,2	-	-
2.17	-	-	-	60	-	8	-

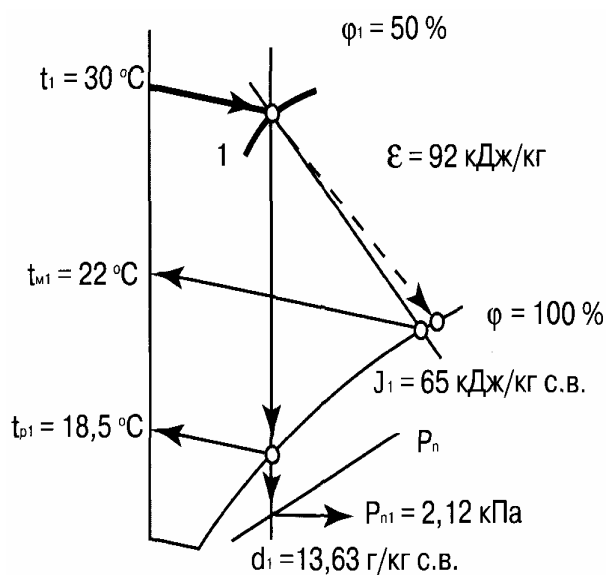


Рис. 2.1.

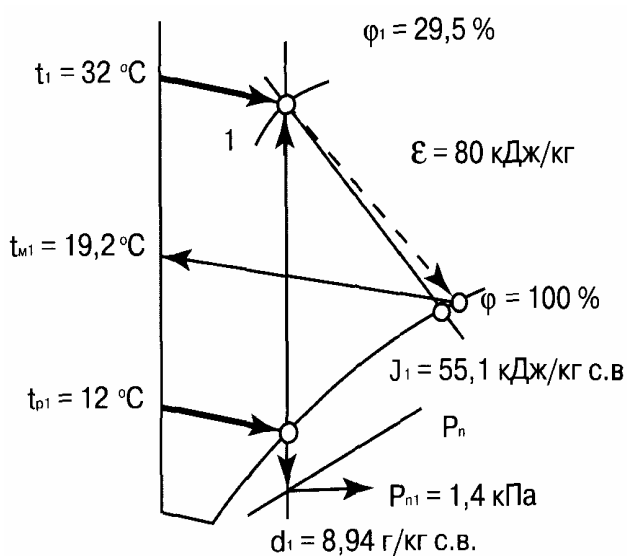


Рис. 2.2.

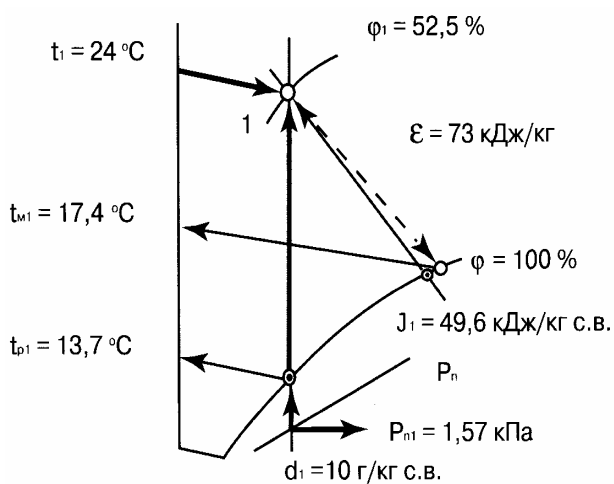


Рис. 2.3.

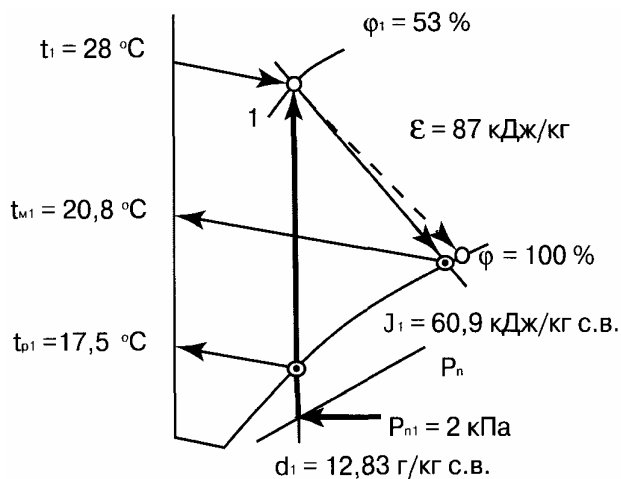


Рис. 2.4.

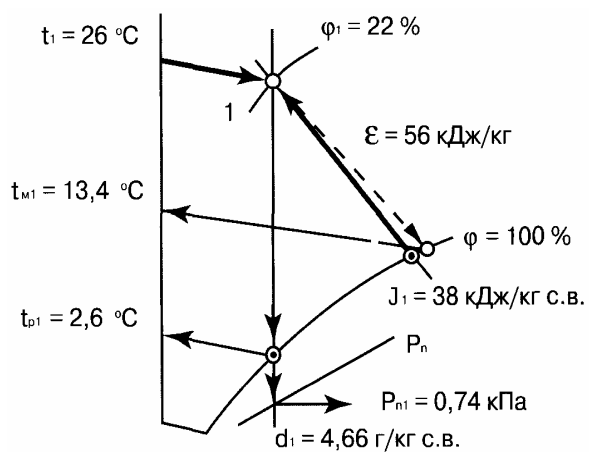


Рис. 2.5.

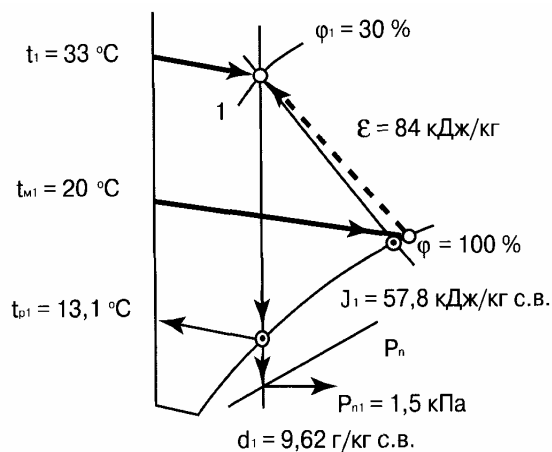


Рис. 2.6.

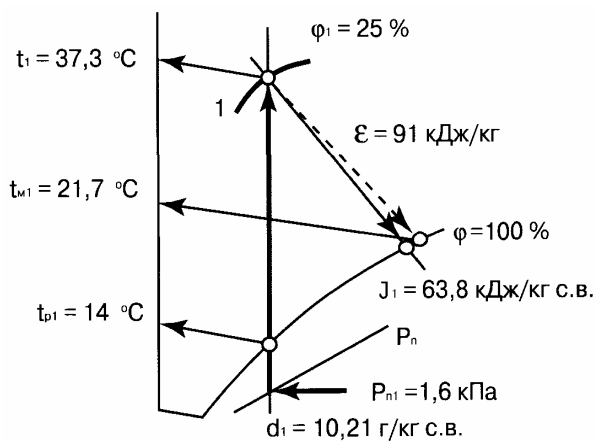


Рис. 2.7.

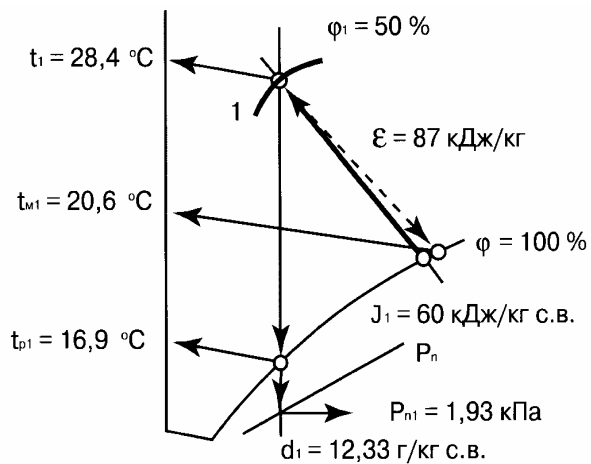


Рис. 2.8.

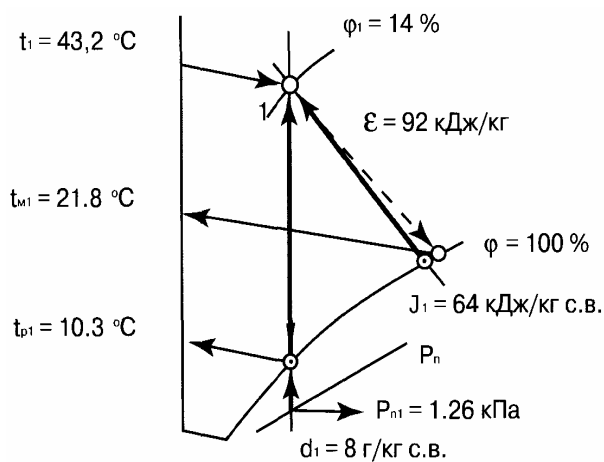


Рис. 2.9.

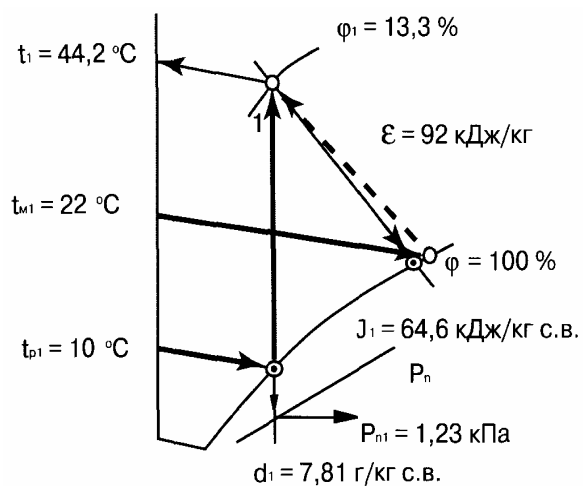


Рис. 2.10.

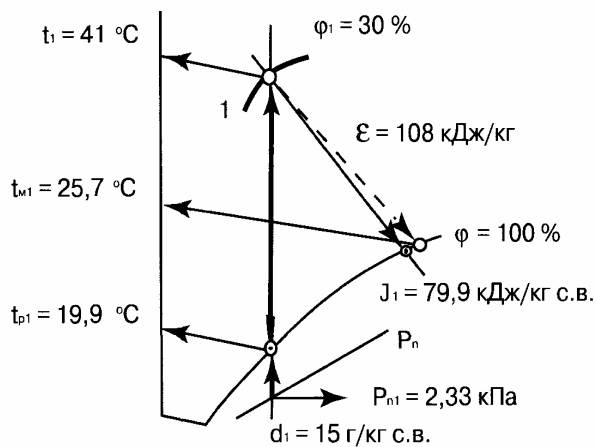


Рис. 2.11.

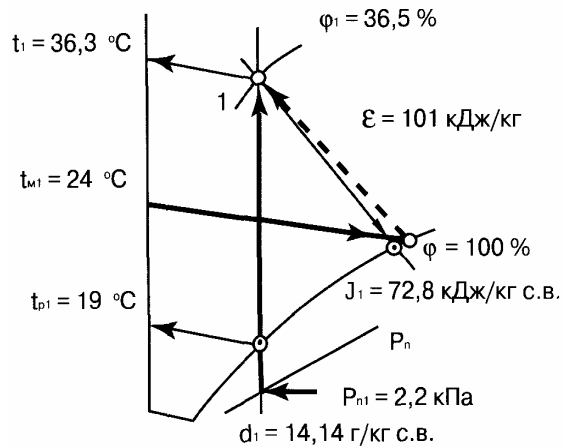


Рис. 2.12.

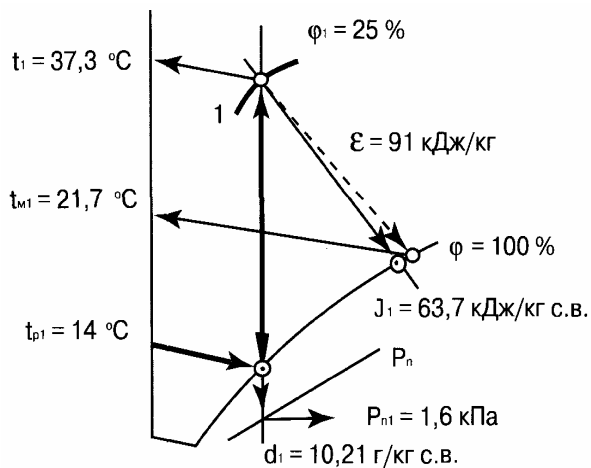


Рис. 2.13.

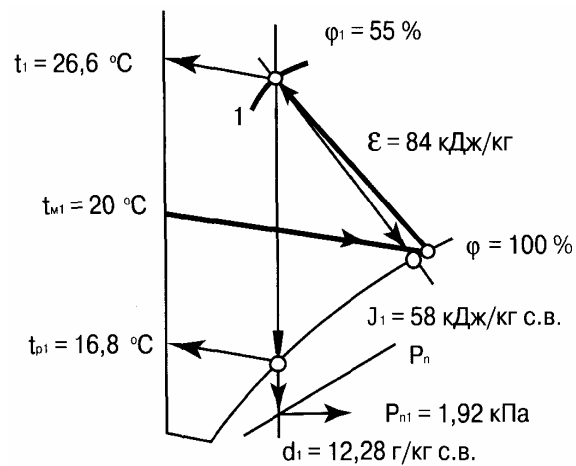


Рис. 2.14.

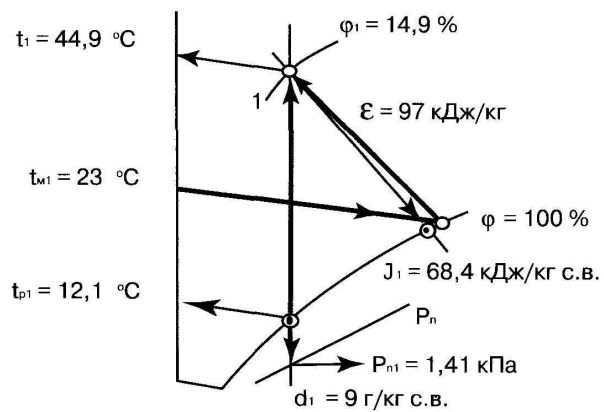


Рис. 2.15.

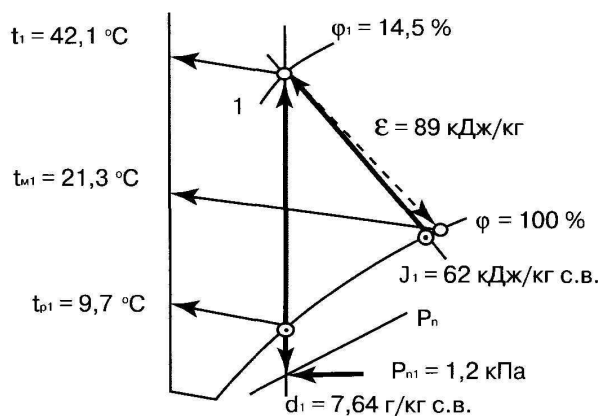


Рис. 2.16.

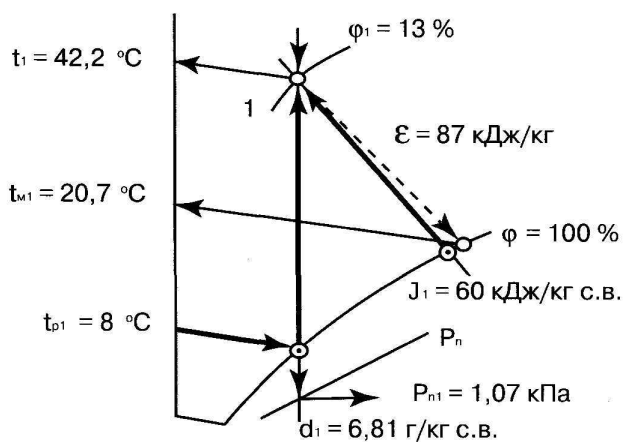


Рис. 2.17.

Ці лінії називаються **променями процесів** зміни стану повітря. Напрямок променя процесу на $J-d$ – діаграмі визначається кутовим **коефіцієнтом ϵ** . Якщо параметри початкового стану повітря – J_1 і d_1 , а кінцевого – J_2 і d_2 , то кутовий коефіцієнт виражається відношенням $\Delta J/\Delta d$, тобто:

$$\epsilon = \frac{J_2 - J_1}{d_2 - d_1} \cdot 1000 \quad (5.1)$$

Величина кутового коефіцієнта вимірюється в кДж/кг вологі.

Якщо в рівнянні (5.1) чисельник і знаменник помножити на масову витрату повітря G , кг/ч, що оброблюється, то отримаємо:

$$\epsilon = \frac{(J_2 - J_1) \cdot G}{(d_2 - d_1) \cdot G} \cdot 1000 = \frac{Q_p}{W}, \quad (5.2)$$

де Q_p – повна кількість тепла, яку передано при зміні стану повітря, кДж/ч;

W – кількість вологі, яку передано в процесі зміни стану повітря, кг/ч.

Залежно від співвідношення ΔJ і Δd кутовий коефіцієнт ϵ може змінювати свій знак і величину від 0 до $\pm\infty$.

На рис. 3 показані промені характерних змін стану вологого повітря і відповідні їм значення кутового коефіцієнта.

1. Вологе повітря з початковими параметрами J_1 і d_1 нагрівається при постійному вологовміст до параметрів точки 2, тобто $d_2 = d_1$, $J_2 > J_1$. Кутовий коефіцієнт променя процесу дорівнює:

$$\epsilon = \frac{J_2 - J_1}{d_2 - d_1} \cdot 1000 = \pm\infty$$

Такий процес здійснюється, наприклад, в поверхневих повітрянагрівачах, коли температура й ентальпія повітря зростають, відносна вологість зменшується, але вологовміст залишається постійним.

2. Вологе повітря одночасно нагрівається і зволожується та набуває параметрів точки 3. Кутовий коефіцієнт променя процесу $\epsilon_3 > 0$. Такий процес протікає, коли припливне повітря асимілює тепло- і вологовиділення в приміщенні.

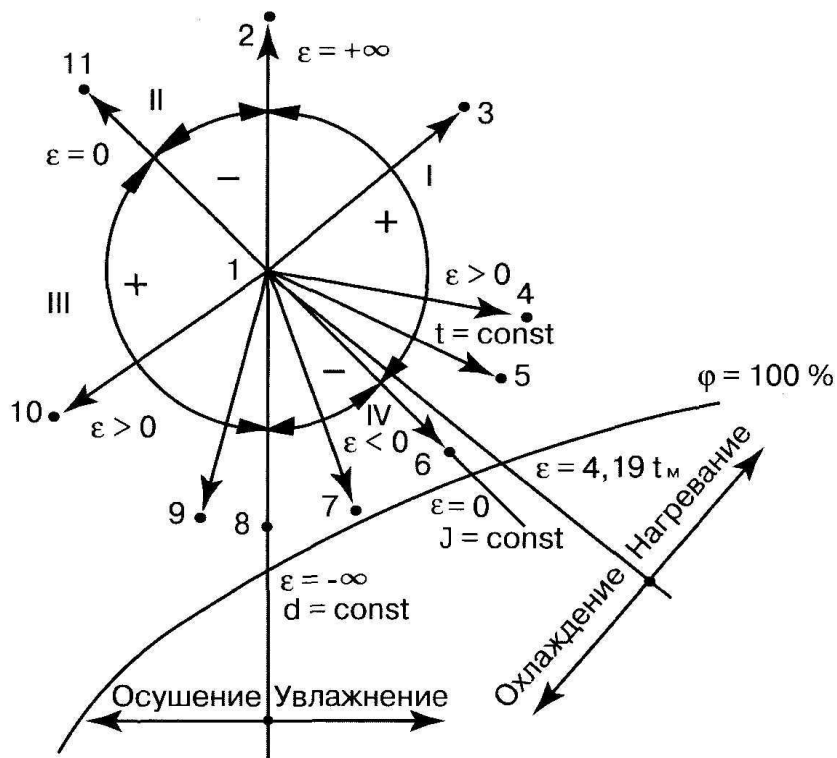


Рис. 3 – Кутовий коефіцієнт на J-d діаграмі

3. Вологе повітря зволожується при постійній температурі до параметрів точки 4, $\epsilon_4 > 0$. Практично такий процес здійснюється при зволоженні припливного або внутрішнього повітря насиченою водяною парою.

4. Вологе повітря зволожується і нагрівається з підвищенням ентальпії до параметрів точки 5. Оскільки ентальпія і вологовміст повітря збільшуються, то $\epsilon_5 > 0$. Зазвичай такий процес відбувається при безпосередньому контакті повітря з водою в камерах зрошування і в градирнях.

5. Зміна стану вологого повітря відбувається при постійній ентальпії $J_6 = J_1 = \text{const}$. Кутовий коефіцієнт такого променя процесу $\epsilon_6 = 0$, оскільки $\Delta J = 0$.

Процес ізоентальпійного зволоження повітря циркуляційною водою широко використовується в системах кондиціонування. Він здійснюється в камерах зрошування або в апаратах із насадкою, для зрошення.

При контакті ненасиченого вологого повітря з дрібними краплями або тонкою плівкою води без відведення або підведення тепла ззовні, вода в

результаті випаровуються зволожує й охолоджує повітря, набуваючи температури мокрого термометра.

Як впливає з рівняння 4.21, у загальному випадку кутовий коефіцієнт променя процесу при ізоентальпійному зволоженні не дорівнює нулю, оскільки

$$\epsilon_6 = \frac{J_6 - J_1}{d_6 - d_1} \cdot 1000 = t_m \cdot c_w = 4,186 \cdot t_m,$$

де $c_w = 4,186$ – питома теплоємність води, кДж/кг·°С.

Дійсний ізоентальпійний процес, при якому $\epsilon = 0$, можливий лише при $t_m = 0$.

6. Вологе повітря зволожується й охолоджується до точки 7. У цьому випадку кутовий коефіцієнт $\epsilon_7 < 0$, оскільки $J_7 - J_1 < 0$, а $d_7 - d_1 > 0$. Такий процес протікає в камерах форсунок зрошування при контакті повітря з охолодженою водою, що має температуру, вище за точку роси оброблюваного повітря.

7. Вологе повітря охолоджується при постійному вологовмісті до параметрів точки 8. Оскільки $\Delta d = d_8 - d_1 = 0$, а $J_8 - J_1 < 0$, то $\epsilon_8 = -\infty$. Процес охолодження повітря при $d = \text{const}$ відбувається в поверхневих повітроохолоджувачах при температурі поверхні теплообміну вище за температуру точки роси повітря, коли немає конденсації вологи.

8. Вологе повітря охолоджується й осушується до параметрів точки 9. Вираження кутового коефіцієнта в цьому випадку має вигляд:

$$\epsilon_9 = \frac{J_9 - J_1}{d_9 - d_1} \cdot 1000 = \frac{-\Delta J}{-\Delta d} \cdot 1000 > 0$$

Охолодження з осушенням відбувається в камерах зрошування або в поверхневих повітроохолоджувачах при контакті вологого повітря з рідкою або твердою поверхнею, що має температуру нижче за точку роси.

Відзначимо, що процес охолодження з осушенням при безпосередньому контакті повітря й охолодженої води обмежений дотичною, проведеною з точки 1 до кривої насичення $\phi = 100\%$.

9. Глибоке осушення й охолодження повітря до параметрів точки 10 відбувається при прямому контакті повітря з охолодженим абсорбентом, наприклад, розчином хлористого літію в камерах зрошування або в апаратах з насадкою для зрошення. Кутовий коефіцієнт $\epsilon_{10} > 0$.

10. Вологе повітря осушується, тобто віддає вологу, при постійній ентальпії до параметрів точки 11. Вираження кутового коефіцієнта має вигляд

$$\epsilon_{11} = \frac{J_{11} - J_1}{d_{11} - d_1} \cdot 1000 = 0$$

Такий процес можна здійснити за допомогою розчинів абсорбентів або твердих адсорбентів. Зазначимо, що реальний процес матиме кутовий коефіцієнт $\epsilon_{11} = 4,186t_{11}$, де t_{11} – кінцева температура повітря за сухим термометром.

Із рис. 3. зрозуміло, що всі можливі зміни стану вологого повітря розташовуються на полі $J-d$ – діаграми в чотирьох секторах, кордонами яких є лінії $d = \text{const}$ і $J = \text{const}$. У секторі I процеси відбуваються зі збільшенням ентальпії та вологовмісту, тому значення $\epsilon > 0$. У секторі II відбувається осушення повітря зі збільшенням ентальпії та значення $\epsilon < 0$. У секторі III процеси протікають зі зменшенням ентальпії та вологовмісту і $\epsilon > 0$. У секторі IV відбуваються процеси зволоження повітря з пониженням ентальпії, тому $\epsilon < 0$.

5.3 ПОБУДОВА ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ СТАНУ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ НА $J-d$ ДІАГРАМІ

5.3.1 Нагрівання й охолодження вологого повітря в поверхневих теплообмінниках

Нагрівання вологого повітря при його контакті з сухою поверхнею, що має вищу температуру, відбувається при постійному вологовмісту.

Якщо відомий початковий стан повітря (точка 1), то новий його стан після нагрівання на $J-d$ діаграмі визначиться як точка перетину лінії $d_1 = d_2 = \text{const}$ і лінії ізотерми t_2 (рис. 4). Для точки 2, так само як і для точки 1, можна

визначити всі необхідні параметри і, зокрема, початкове та кінцеве значення ентальпії J_1 і J_2 . Знаючи різницю $J_2 - J_1$ і кількість сухого повітря, яку треба нагрівати в одиницю часу, G_c , кг/ч, можна визначити кількість тепла, необхідного для нагрівання повітря Q_T :

$$Q_T = G_c(J_2 - J_1).$$

Нагадаємо, що G_c – маса сухої частини повітря, дорівнює:

$$G_c = \frac{G_B}{1 + \frac{d}{1000}},$$

де G_B – маса вологого повітря.

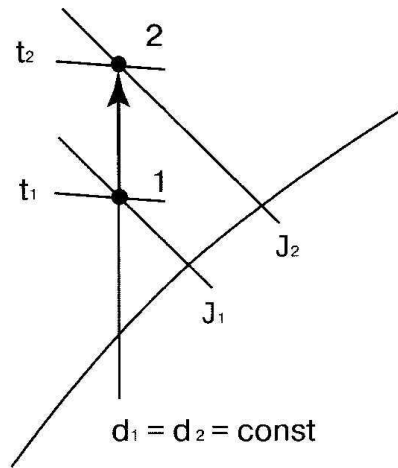


Рис. 4

При охолодженні вологого повітря в поверхневих повітреохолоджувачах до температури t_3 , вищої за температуру точки роси t_p , процес зображається лінією $d_3 = d_1 = \text{const}$ (рис. 5).

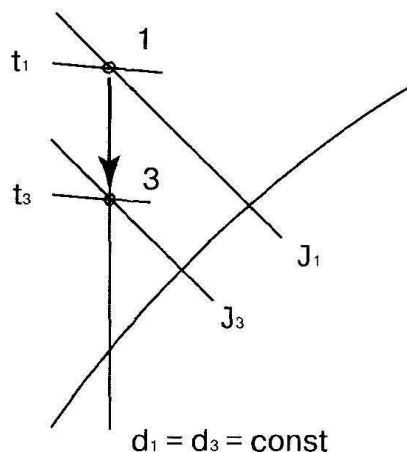


Рис. 5

Кількість тепла, що відводиться від повітря при охолодженні від стану 1 до стану 3, визначається за формулою

$$Q_x = G_c(J_1 - J_3)$$

Ця кількість тепла складає розрахункову холодопродуктивність поверхневого повітроохолоджувача.

Якщо охолодження вологого повітря здійснюється до температури, яка нижче за температуру точки роси, то на поверхні повітреохолоджувача відбувається часткова конденсація водяної пари, що знаходиться у вологому повітрі.

У роботі [10] розглянуто два граничні випадки такого процесу.

При постійній температурі стінки, що охолоджує, зміна стану повітря зображається на $J-d$ – діаграмі прямою лінією, що сполучає точку початкового стану повітря з точкою на лінії насичення при постійній температурі поверхні t_n (рис. 6).

Проте температура поверхні, що охолоджує, може вважатися постійною і близькою до температури холодильного агента t_b лише в повітреохолоджувачах безпосереднього випару з мідними гладкими трубками.

Другий граничний випадок можливий, якщо тепловий опір на зовнішній обрешеті поверхні близький до нуля, тобто температура поверхні t_n дорівнює температурі повітря t_b . Тоді на початку процесу температура t_n вища за температуру точки роси t_p , і охолодження повітря відбувається без його осушення. Такий процес зображується на $J-d$ – діаграмі лінією $d = const$ до її перетину з лінією насичення. Після цього починається конденсація вологи, і процес охолодження й осушення повітря проходить по лінії насичення.

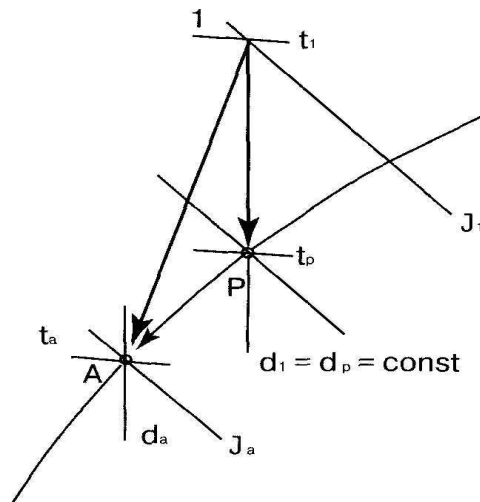


Рис. 6

При великій площі охолодження температура повітря, що виходить, наблизатиметься до температури холодильного агента.

Розрахункові холодопродуктивність поверхневого повітроохолоджувача визначають за формулою

$$Q_x = G_c(J_1 - J_a)$$

Масу сконденсованої води обчислюють за формулою

$$M_v = G_c(d_1 - d_a)$$

Розглянутих граничних випадків насправді не буває. Реальний процес зміни стану повітря в повітроохолоджувачі протікає по кривій, розташованій усередині трикутника 1-P-a, і відносна вологість охолодженого повітря зазвичай менше 100%.

5.3.2 Зміна стану ненасиченого вологого повітря при контакті з водою

У кондиціюванні повітря широко використовуються апарати, в яких повітря взаємодіє з плівкою або розпорошеними краплями води, що мають різну температуру.

Зазвичай передбачають, що безпосередньо над поверхнею крапель або плівки води знаходиться тонкий шар повітря, повністю насичений водяною парою і що має температуру яка дорівнює температурі води.

В цьому випадку процес тепло- і масообміну між вологим повітрям і водою

можна розглядати як процес змішування основного потоку повітря з насиченим повітрям над поверхнею води.

Використовуючи вказане припущення, А. А. Гоголін [10] сформулював правило, яке називається законом прямої лінії: при взаємодії вологого повітря з водою, що має постійну температуру, зміна його стану зображується на $J-d$ –діаграмі прямою, що проходить через точку початкового стану повітря і точку на лінії насичення ($\phi = 100\%$) з температурою, яка дорівнює температурі води.

При великій площі поверхні та довгому часі контакту процес продовжується до тих пір, поки повітря не стане насиченим і не прийме температуру води.

Вся область можливих змін параметрів повітря початкового стану, заданого на $J-d$ – діаграмі точкою А, обмежується прямими АВ і АС, проведеними з точки А, дотичними до кривої насичення (рис. 7). При цьому залежно від температури води можна виділити наступні зони.

Зона 1. Температура води нижча за температуру точки роси оброблюваного повітря. У результаті взаємодії вологого повітря з водою такої температури зменшуються: ентальпія, температура і вологовміст повітря, тобто відбуваються процеси охолодження й осушення повітря.

Зона 2. Температура води дорівнює температурі точки роси. У цьому процесі зменшуються ентальпія і температура повітря при постійному вологовмісті.

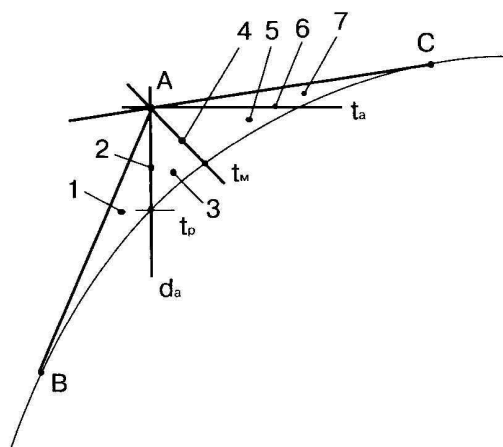


Рис. 7 – Можливі процеси взаємодії вологого повітря та води:
1...7 – зони процесів

Зона 3. Температура води вища за температуру точки роси повітря, але нижча за його температуру за мокрим термометром. При обробці повітря збільшується його вологовміст, але зменшуються ентальпія і температура, отже, повітря зволожується й охолоджується.

Зона 4. Температура води дорівнює температурі повітря за мокрим термометром. Такий процес називають адіабатним зволоженням повітря циркулюючою водою. Це єдиний реальний процес, при якому температура води залишається постійною.

Зона 5. Температура води вище за температуру повітря за мокрим термометром, але нижче за його температуру за сухим термометром. При контакті з такою водою вологовміст і ентальпія повітря зростають, а його температура за сухим термометром знижується. Проте, оскільки процес зволоження супроводжується зростанням ентальпії, такий процес слід вважати процесом зволоження та нагрівання.

Зона 6. Температура води дорівнює температурі повітря за сухим термометром. В цьому випадку відбувається зростання вологовмісту й ентальпії повітря, а його температура за сухим термометром залишається постійною.

Зона 7. Температура води вище за температуру повітря за сухим термометром. Процес протікає так само, як і в зоні 6, але одночасно відбувається підвищення температури повітря.

У реальних апаратах витрата води і поверхня контакту мають кінцеві значення, і температура води в процесі тепло- і масообміну не може бути постійною (окрім режиму адіабатного зволоження).

Тому фактичні процеси зміни стану вологого повітря при його обробці водою зображаються кривими лініями, спрямованими з точки початкового стану повітря до точки на кривій насичення, яка відповідає кінцевій температурі води. Причому відносна вологість повітря, що виходить з контактного апарату, практично дорівнює 85...95%.

5.3.3 Зволоження вологого повітря парою

Зволоження припливного або внутрішнього повітря насиченою водяною парою досить широко використовується в сучасних установках кондиціонування.

Вираження кутового коефіцієнта променя процесу зволоження повітря парою можна отримати, використовуючи рівняння балансів тепла і вологи.

Припустимо, що початкові параметри повітря – J_1 і d_1 , а кінцеві після зволоження – J_2 і d_2 , Кількість сухої частини зволожуваного повітря – G_c і кількість насиченої пари – G_n , його питома ентальпія – J_n .

Рівняння балансів тепла і вологи мають вигляд:

$$G_c \cdot J_1 + G_\Pi \cdot J_\Pi = G_c \cdot J_2;$$

$$G_c \cdot \frac{d_1}{1000} + G_{\Pi} = G_c \cdot \frac{d_2}{1000}.$$

Розділивши перше рівняння на друге і виконавши скорочення, отримаємо вираження для кутового коефіцієнта:

$$\varepsilon = \frac{J_2 - J_1}{d_2 - d_1} \cdot 1000 = J_{\Pi}$$

Побудова процесу на $J-d$ – діаграмі показана на рис. 8. Вихідними даними є початкове d_1 і кінцеве d_2 , вологовміст оброблюваного повітря, його кінцева ϕ_2 відносна вологість і питома ентальпія пари J_n , що подається.

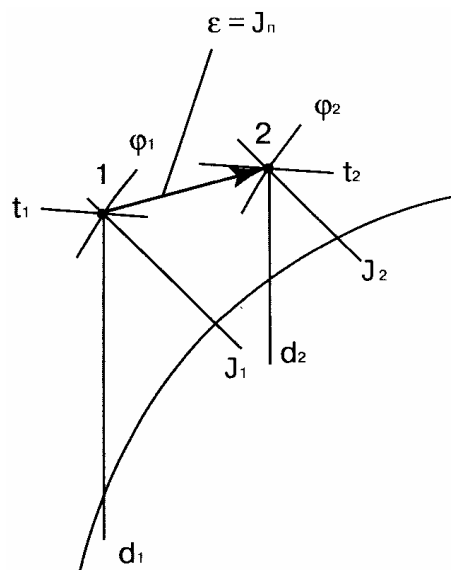


Рис. 8

За відсутності технологічних даних із достатньою точністю можна прийняти $J_{\text{п}} \approx 2680$ кДж/кг.

Побудову процесу починають із нанесення на $J-d$ – діаграмі точки 2, що характеризує необхідні параметри припливного або внутрішнього повітря. Через крапку 2 проводять промінь процесу з кутовим коефіцієнтом $\epsilon = J_{\text{п}}$ до перетину з лінією $d_1 = \text{const}$. Отримана точка 1 характеризує параметри повітря до його зволоження.

Кількість пари, потрібної для зволоження повітря, дорівнює:

$$G_{\text{п}} = \frac{G_{\text{с}}(d_2 - d_1)}{1000}, \text{ кг/ч}$$

Відзначимо, що процес зволоження паром протікає з невеликим підвищенням температури повітря.

Наприклад, якщо $d_1 = 0,4$ г/кг с.в. і $t_1 = 20$ °С, то після зволоження до $d_2 = 6,4$ г/кг с.в. температура повітря $t_2 = 20,9$ °С.

5.3.4 Осушення повітря адсорбентами

У разі необхідності глибокого осушення й одночасного нагрівання вологого повітря в техніці кондиціонування застосовують тверді поглиначі вологі (адсорбенти), які дозволяють отримати практично сухе повітря. Такими поглиначами можуть бути: активоване вугілля, силікагель, алюмогель та ін.

Розглянемо будову процесу адсорбції на $J-d$ діаграмі. Для виведення вираження кутового коефіцієнта променя процесу адсорбції запишемо рівняння балансу теплоти й вологи:

$$G_{\text{с}} \cdot J_2 = G_{\text{с}} \cdot J_1 - G_{\text{п}} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_2 - q \cdot G_{\text{п}} + 420 G_{\text{п}};$$

$$G_{\text{с}} \cdot \frac{d_2}{1000} = G_{\text{с}} \cdot \frac{d_1}{1000} - G_{\text{п}}.$$

де $G_{\text{п}}$ – кількість водної пари (кг), що сконденсованої в адсорбері;

$c_{\text{в}}$ – питома теплоємність води ;

q – витрата теплоти на нагрівання адсорбенту (приймається 420 кДж/кг адсорбованої вологи);

420 – питома теплота змочування, кДж/кг адсорбованої вологи;

J_1, d_1, t_1 – початкові параметри повітря;

J_2, d_2, t_2 – кінцеві параметри повітря. Поділивши перше рівняння на друге, після перетворень отримаємо:

$$\varepsilon = 1000 \frac{J_2 - J_1}{d_2 - d_1} = \frac{G_{\text{п}} \cdot c_{\text{в}} \cdot t_2 - q \cdot G_{\text{п}} + 420 G_{\text{п}}}{-G_{\text{п}}} = c_{\text{в}} \cdot t_2 + q - 420 \approx c_{\text{в}} \cdot t_2 = 4,19 t_2$$

Таким чином, кутовий коефіцієнт променя процесу дуже близький до ізоентальпи $J_1 = \text{const}$, тобто осушення повітря адсорбентом – практично адіабатний процес, спрямований убік, протилежний процесові адіабатного зволоження повітря водою.

У процесі осушення температура повітря значно зростає і, залежно від початкового стану, може досягати 40 ... 50 °С і більше.

У достатньою для практичних розрахунків точністю кінцеву температуру повітря t_2 можна визначити за формулою

$$t_2 = t_1 + \frac{r}{c_{\text{вл}}} \cdot \frac{d_1 - d_2}{1000},$$

де r – питома теплота паротворення, що обчислюється за формулою (3.6) за температурою повітря t_1 ;

$c_{\text{вл}} = 1,006 + 1,805 d_1$, кДж/(кг·К) – питома теплоємність вологого повітря.

Побудова процесу на J-d діаграмі показана на рис. 9.

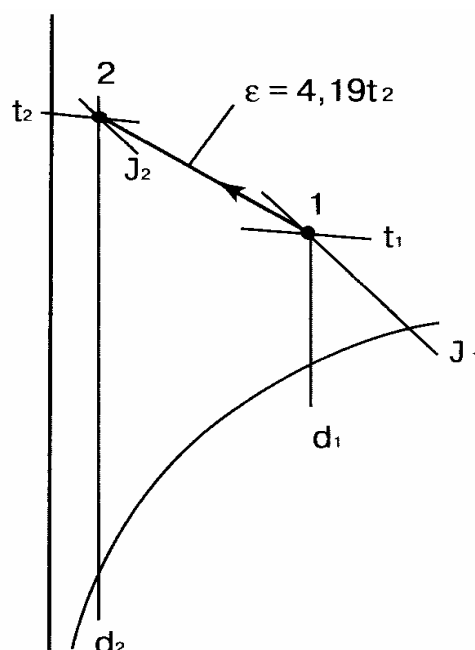


Рис. 9

На $J-d$ – діаграмі наносять крапку 1, що характеризує початковий стан вологого повітря d_1 і t_1 .

Знаючи необхідне значення вологовмісту d_2 у точці 2, обчислюють кінцеву температуру повітря t_2 і кутовий коефіцієнт променя процесу $\varepsilon = 4,19t_2$.

Через точку 1 проводять промінь процесу до перетину з лінією $d_2 = \text{const}$ й отримують точку 2, параметри якої характеризують кінцевий стан повітря J_2, d_2, t_2 .

Якщо набуто значення t_2 значно відхиляється від розрахункового, то побудову процесу можна повторити, змінивши вихідне значення t_2 .

Кількість води, що відводиться від повітря в адсорбері (кг/ч), визначають за формулою

$$G_{\text{п}} = \frac{G_{\text{с}}(d_2 - d_1)}{1000}.$$

Мінімальне значення d_2 може бути 0,03 г/кг с.в.

5.3.5 Осушення повітря абсорбентами

Для осушення вологого повітря з пониженням ентальпії застосовують рідкі поглиначі води – абсорбенти.

Значного поширення в системах кондиціонування повітря набули водні розчини солей хлористого кальцію $\text{CaCl}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ і хлористого літію LiCl .

Особливість указаних розчинів полягає в тому, що за рівних температур тиск насиченої водної пари в пограничному шарі над поверхнею розчину нижчий за тиск насиченої водної пари над поверхнею води.

Уживання рідких сорбентів дозволяє здійснювати безперервну регенерацію розчину й отримувати осушене повітря стосовно низької температури, оскільки в контур рециркуляції розчину, окрім осушувача (контактного апарату), можуть включатися кип'ятильник (для відновлення концентрації розчину) і охолоджувач (для охолодження розчину перед подачею його до повітреосушувача).

Регулюючи ступень охолодження рідкого сорбенту, можна осушувати повітря з підвищенням температури (промінь 1– 2 рис. 10), ізотермічно (промінь 1– 3) і з пониженням температури (промінь 1– 4).

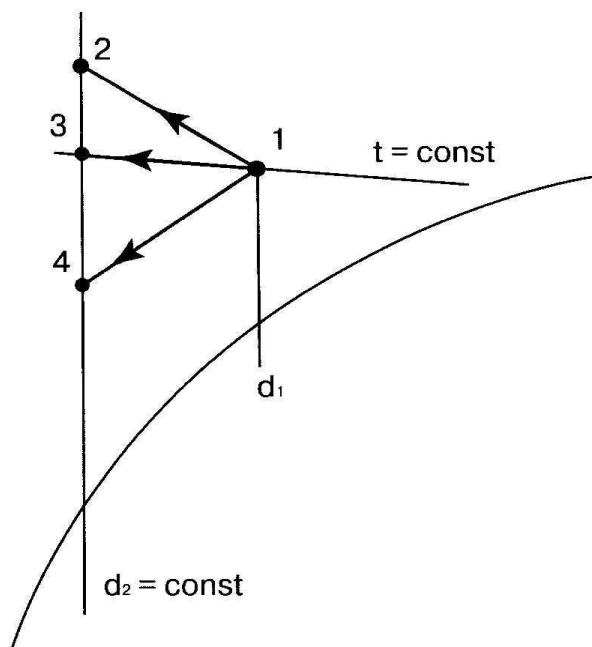


Рис. 10

Ізотермічне осушення вологого повітря можна проводити за однакових початкових температур повітря та зрошуючого розчину. При чому витрата останнього має бути такою, щоб теплота конденсації водної пари й теплота розбавлення трохи підвищували температуру розчину.

Для осушення повітря з підвищенням температури розчин повинен мати більшу температуру, ніж повітря, що обробляється, проте, при цьому пружність водної пари над поверхнею розчину має бути меншою пружності водної пари в повітрі, що осушується.

Для осушення повітря з одночасним пониженням температури необхідно, щоб температура розчину була нижчою, ніж під час ізотермічного процесу.

Визначимо, що абсорбенти осушують повітря не так глибоко, як тверді поглиначі, наприклад, кінцевий вологовміст повітря при вживанні розчину хлористого літію не менше 1 г/кг с.в.

5.3.6 Процеси змішування різних мас повітря з різними параметрами

У системах кондиціонування часто здійснюється змішування двох потоків повітря з різними початковими параметрами. Передбачимо, що змішується G_1 (кг) вологого повітря з параметрами J_1 , d_1 і G_2 (кг) вологого повітря з параметрами J_2 , d_2 (рис. 11).

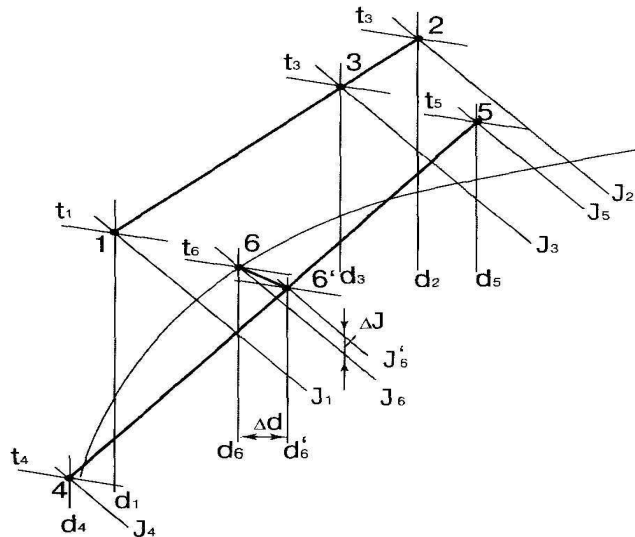


Рис. 11

Загалом, кількість сухого повітря G_c (кг), що міститься в G (кг) вологого повітря може виражатися відношенням:

$$G_c = \frac{G}{1 + d}, \text{ кг.}$$

Тоді, баланс вологи, що бере участь у процесі змішування, має вигляд:

$$G_{c1} \cdot d_1 + G_{c2} \cdot d_2 = (G_{c1} + G_{c2}) \cdot d_3,$$

де d_3 – вологовміст суміші.

Аналогічно можна записати рівняння для теплового балансу:

$$G_{c1} \cdot J_1 + G_{c2} \cdot J_2 = (G_{c1} + G_{c2}) \cdot J_3,$$

де J_3 – ентальпія суміші.

Представимо два останні вираження у вигляді:

$$G_{c1} (J_1 - J_3) = G_{c2} (J_3 - J_2);$$

$$G_{c1} (d_1 - d_3) = G_{c2} (d_3 - d_2).$$

Розділивши перше рівняння на друге, отримаємо:

$$\frac{J_1 - J_3}{d_1 - d_3} = \frac{J_3 - J_2}{d_3 - d_2}.$$

У координатній сітці J і d – це вираження рівняння прямої, що проходить через задані точки 1 і 2. Величини J_3 і d_3 – координати точки суміші 3, що лежить на прямій 1–2.

Положення точки 3 на прямій 1–2 визначають шляхом ділення відрізання 1–2 на частини:

$$\frac{G_{c1}}{G_{c3}} = \frac{G_{c2}}{G_{c3}}.$$

Із рівнянь матеріального й теплового балансу можна отримати залежність:

$$\frac{J_1 - J_3}{J_3 - J_2} = \frac{d_1 - d_3}{d_3 - d_2} = \frac{G_{c2}}{G_{c1}}.$$

Аналітично значення вологовмісту й ентальпії суміші слід визначати за формулами:

$$d_3 = \frac{G_{c1} \cdot d_1 + G_{c2} \cdot d_2}{G_{c1} + G_{c2}};$$
$$J_3 = \frac{G_{c1} \cdot J_1 + G_{c2} \cdot J_2}{G_{c1} + G_{c2}}.$$

На практиці кондиціонування повітря значення G і G_c відрізняються зазвичай на 1...2%, тому деякі автори пропонують вести побудови та розрахунки зі змішенням вологого повітря, використовуючи значення G , проте в окремих випадках це може призвести до значної погрішності.

Під час побудови процесу змішування для холодної пори року точка суміші б' (рис. 11) може виявитися нижчою за кривою $\phi = 100\%$, тобто процес змішування супроводжується конденсацією частини водної пари, що міститься в суміші.

Разом із водною парою, що сконденсувалася, із повітря піде частина тепла, рівна $Q_{\text{кон}}$:

$$Q_{\text{кон.}} = \frac{\Delta d}{1000} \cdot t_m \cdot c_{\text{ж}},$$

де $\Delta d = d'_6 - d_6$ – кількість конденсату, що виділився, г/кг с.в.;

t_m – температура конденсату, рівна температурі мокрого термометра °С;

$c_{ж}$ – теплоємність конденсату, кДж/кг·°С.

Із теплового балансу впливає, що ентальпія повітря після випадання конденсату зменшується, тобто:

$$J_6 = J' - \frac{\Delta d}{1000} \cdot t_m \cdot c_{ж}.$$

Ураховуючи, що величина Δd зазвичай дуже мала, у практичних розрахунках останнім можна нехтувати й уважати, що $J_6 = J'_6$.

5.3.7 Зміна стану повітря у приміщеннях із тепло- та вологовиділенням

Загалом під час проектування систем вентиляції й кондиціювання повітря необхідно враховувати надходження до приміщення тепла, вологи, пилу й газових компонентів.

Проте при виділенні пилу та газів стан тепло-вологості повітря зазвичай не змінюється. Тому розглянемо процес зміни стану повітря у приміщенні з тепло- та вологовиділенням.

Джерелами виділення явної та прихованої теплоти є: технологічне устаткування, люди, конструкції, що захищають, штучне освітлення, сонячна радіація, система опалювання й теплота від пари, що надходить до приміщення, а також води, що випаровується. Частина тепла може втрачатися на нагрівання матеріалів і продуктів, що надходять до приміщення та через будівельні конструкції.

Одночасно у приміщенні виділяється водна пара від технологічного устаткування й від людей, а також волога зі змоченої поверхні з температурою, близькою до температури мокрого термометра внутрішнього повітря.

Не зупиняючись на методах розрахунку окремих складників теплового та вологого балансів, запишемо в загальному вигляді рівняння для визначення надлишкових тепло – та вологовиділень:

$$Q_{изб} = Q_{я} + Q_{п} + Q_{л} - Q_{пот},$$

де $Q_{я}$ – сумарна кількість явної теплоти;

$Q_{\text{п}}$ – сумарна кількість повної теплоти;

$Q_{\text{л}}$ – повні тепловиділення від людей;

$Q_{\text{пот}}$ – тепловтрати приміщення.

Величина $Q_{\text{п}}$ визначається за формулою:

$$Q_{\text{п}} = G_{\text{п}} \cdot i_{\text{п}},$$

де $G_{\text{п}}$ – кількість водяної пари, що виділяється від устаткування;

$i_{\text{п}}$ – питома ентальпія водяної пари.

Кількість надлишкової вологи у приміщенні знаходиться за рівнянням:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{п}} + G_{\text{п.л}} + G_{\text{с.п}},$$

де $G_{\text{п.л}}$ – вологовиділення від людей;

$G_{\text{с.п}}$ – кількість вологи, що випаровується зі змоченої поверхні.

$t_2, J_2, \text{ і } d_2$ – нормовані параметри повітря усередині приміщення.

Для асиміляції (поглинання) тепла, що виділяється у приміщення, і вологи до приміщення необхідно подавати припливне повітря в кількості $G_{\text{с}}$, що має нижчі значення параметрів J_1, t_1 і d_1

Запишемо рівняння балансу за теплом і по вологою:

$$G_{\text{с}} \cdot J_1 + Q_{\text{изб}} = G_{\text{с}} \cdot J_2;$$

$$G_{\text{с}} \cdot \frac{d_1}{1000} + G_{\text{в}} = G_{\text{с}} \cdot \frac{d_2}{1000}.$$

Розділивши перший вираз на другий, після відповідних перетворень отримаємо кутовий коефіцієнт променя процесу ϵ , що характеризує зміну стану вологого повітря у приміщенні з тепло- та вологовиділенням:

$$\epsilon = \frac{J_2 - J_1}{d_2 - d_1} \cdot 1000 = \frac{Q_{\text{изб}}}{G_{\text{в}}} = \frac{Q_{\text{я}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{л}} - Q_{\text{пот}}}{G_{\text{п}} + G_{\text{п.л}} + G_{\text{с.п}}}.$$

Набувши значення теплового та вологостного балансів приміщення, можна побудувати процес на $J-d$ – діаграмі.

На $J-d$ – діаграму наносимо точку 2, що характеризує параметри внутрішнього повітря, які визначаються за санітарними або технологічними вимогами й задаються зазвичай значеннями t_2 і ϕ_2 , і визначаємо значення J_2 і d_2 .

Через точку 2 проводимо промінь процесу з відомим кутовим коефіцієнтом ϵ до перетину з лінією певного заданого параметра припливного повітря J_1 , d_1 , t_1 або ϕ_1 й отримуємо точку 1, для якої визначаємо всі вказані вище параметри (рис. 12).

Асимілююча здатність припливного повітря за теплом і вологою визначається відповідно різницею ентальпій $J_2 - J_1$ і вологовмістів $d_2 - d_1$.

Необхідну кількість припливного повітря можна знайти за формулами:

$$G_c = \frac{Q_{изб}}{J_2 - J_1};$$

$$G_c = \frac{G_B}{d_2 - d_1} \cdot 1000.$$

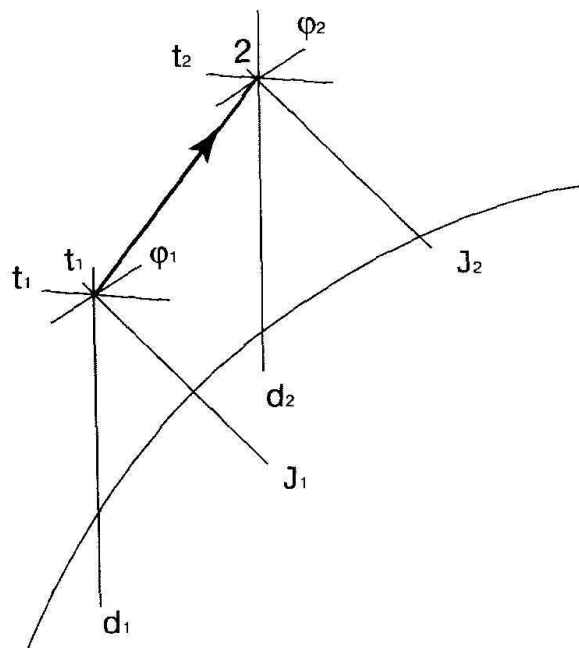


Рис. 12

6. УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА ВЕЛИЧИНИ

c	питома масова теплоємність	Дж/(кг·К)
c'	питома об'ємна теплоємність	Дж/(м ³ ·К)
c_u	питома молярна теплоємність	кДж/(кмоль·К)
c_v	ізохорна теплоємність	Дж/(м ³ ·К)
c_p	ізобарна теплоємність	Дж/(кг·К)
$c_{p,c}$	питома масова теплоємність сухого повітря	Дж/(кг·К)
$c_{v,c}$	питома об'ємна теплоємність сухого повітря	Дж/(м ³ ·К)
$c_{p,v}$	питома масова теплоємність води	Дж/(кг·К)
$c_{p,p}$	питома теплоємність насиченої водної пари за постійного тиску	Дж/(кг·К)
$c_{p,l}$	питома масова теплоємність льоду	Дж/(кг·К)
d	вологівміст вологого повітря	г/кг с.в.
F_H	нормальна складова сили	Н
g_i	масова частка	
J	ентальпія	Дж
i	питома ентальпія	Дж/кг
i_c	питома ентальпія сухого повітря	кДж/кг
i_p	питома ентальпія сухої насиченої водної пари	кДж/кг
i_v	ентальпія киплячої води	кДж/кг
$i_{p,p}$	питома ентальпія перегрітої водної пари	кДж/кг
$i_{n,p}$	питома ентальпія перегрітої водної пари	кДж/кг
M_c	маса сухої частки вологого повітря	
M_p	маса водної пари у вологому повітрі	
m	маса речовини	кг
m_{cm}	маса суміші	кг
m_i	маса компонента суміші	кг
P	тиск	Н/м ² (Па)
P_{cm}	загальний тиск суміші ідеальних газів	Па
P_i	парціальний тиск окремого газу	Па
P_c	тиск сухого повітря	Па
P_H	тиск насиченої водної пари	Па
$P_б$	барометричний тиск	Па
$P_{п,н}$	тиск насиченої водної пари	Па
R_g	газова постійна	Дж/(кг·К)
R_c	газова постійна для сухого повітря	Дж/(кг·К)
R_p	газова постійна водної пари	Дж/(кг·К)
R	універсальна газова постійна	кДж/(кмоль·К)
r	питома теплота паротворення	кДж/кг
$r_{пл0}$	питома теплота плавлення льоду	кДж/кг
$r_{суб}$	питома теплота сублимації льоду	кДж/кг
r_i	об'ємна частка	
S	площа поверхні, нормальної до сили, що діє	м ²
T	абсолютна температура	К
T_c	температура сухого повітря	К
t_H	температура насичення °С	
t_p	температура перегрітої пари	°С
u	питома внутрішня енергія газу	Дж/кг
V	об'єм	м ³
V_m	об'єм, який займає одна моль газу	
V_i	парціальний об'єм компонента	м ³
V_{cm}	об'єм суміші	м ³
v	питомий об'єм	м ³ /кг

ν_0	питомий об'єм газу за нормальних умов	$\text{м}^3/\text{кг}$
$\nu_{\text{в}}$	питомий об'єм води	$\text{м}^3/\text{кг}$
$\nu'_{\text{в}}$	питомий об'єм води у стані насичення	$\text{м}^3/\text{кг}$
$\nu_{\text{п}}$	питомий об'єм водної пари	$\text{м}^3/\text{кг}$
ϕ	відносна вологість повітря	
ρ	густина	$\text{кг}/\text{м}^3$
$\rho_{\text{с}}$	густина сухого повітря	$\text{кг}/\text{м}^3$
$\rho_{\text{в}}$	густина води	$\text{кг}/\text{м}^3$
$\rho_{\text{п}}$	густина водної пари	$\text{кг}/\text{м}^3$
μ	молекулярна вага	кмоль
$\mu_{\text{см}}$	середня молекулярна маса	
$\mu_{\text{с}}$	молярна маса сухого повітря	$\text{кг}/\text{моль}$
$\mu_{\text{п}}$	молярна маса водяної пари	
χ	функція, що коректує	

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

в	вода
г	газ
л	лід
н	насичення
н.п	насичена пара
0	нормальні умови
п	пара
пл	плавлення
п.п	перегріта пара
с	сухе повітря
см	суміш
суб	сублімація
i	порядковий номер компонента
p	Ізохорний процес
ν	ізобарний процес

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Таблицы психрометрические. ГОСТ 8.524-85. - М., 1985.
2. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства: Учебное пособие. - СПб.; СПбГАХИТ, 1998.
3. ASHRAE HANDBOOK. FUNDAMENTALS. ASHRAE, Atlanta, 2001.
4. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. - М.: Энергия, 1980.
5. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. - М.: "Высшая школа", 1971.
6. Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. - М.: Стройиздат, 1985.
7. Тарабанов М.Г. *J-d* диаграмма влажного воздуха. Методические указания. - Волгоград, 2003.
8. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. -Л., ВВИТКУ, 1970.
9. Воронец Д., Косич Д. Влажный воздух. - М.: Энергоатомиздат, 1984.
10. Зінич П.Л. Вентиляція громадських будівель. Навчальний посібник.- К.:КНУБА, 2002 - 256 с.

Додаток 1

Тиск насиченої водяної пари над поверхнею льоду ($t < 0$) і чистої води ($t > 0$), кПа

Температура °C	Десяті частки, °C									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-40	0,01285	0,01270	0,01256	0,01242	0,01228	0,01214	0,01200	0,01186	0,01173	0,01160
-39	0,01438	0,01422	0,01406	0,01390	0,01375	0,01359	0,01344	0,01329	0,01314	0,01299
-38	0,01608	0,01590	0,01572	0,01555	0,01538	0,01520	0,01504	0,01487	0,01470	0,01454
-37	0,01796	0,01776	0,01757	0,01737	0,01718	0,01699	0,01681	0,01662	0,01644	0,01626
-36	0,02004	0,01983	0,01961	0,01940	0,01919	0,01898	0,01877	0,01856	0,01836	0,01816
-35	0,02235	0,02211	0,02187	0,02163	0,02140	0,02117	0,02094	0,02071	0,02049	0,02026
-34	0,02490	0,02463	0,02437	0,02411	0,02385	0,02359	0,02334	0,02309	0,02284	0,02259
-33	0,02771	0,02742	0,02713	0,02684	0,02656	0,02627	0,02599	0,02572	0,02544	0,02517
-32	0,03082	0,03050	0,03018	0,02986	0,02954	0,02923	0,02892	0,02861	0,02831	0,02801
-31	0,03424	0,03389	0,03353	0,03318	0,03284	0,03249	0,03215	0,03181	0,03148	0,03115
-30	0,03802	0,03762	0,03723	0,03685	0,03646	0,03608	0,03571	0,03534	0,03497	0,03461
-29	0,04217	0,04173	0,04130	0,04088	0,04046	0,04004	0,03963	0,03922	0,03881	0,03841
-28	0,04673	0,04625	0,04578	0,04532	0,04485	0,04439	0,04394	0,04349	0,04304	0,04260
-27	0,05174	0,05122	0,05070	0,05019	0,04968	0,04918	0,04868	0,04819	0,04770	0,04721
-26	0,05725	0,05668	0,05611	0,05554	0,05499	0,05443	0,05389	0,05334	0,05280	0,05227
-25	0,06329	0,06266	0,06204	0,06142	0,06081	0,06020	0,05960	0,05900	0,05841	0,05783
-24	0,06991	0,06922	0,06854	0,06786	0,06719	0,06652	0,06586	0,06521	0,06457	0,06392
-23	0,07716	0,07641	0,07566	0,07492	0,07418	0,07345	0,07273	0,07202	0,07131	0,07061
-22	0,08510	0,08427	0,08345	0,08264	0,08184	0,08104	0,08025	0,07947	0,07869	0,07792
-21	0,09378	0,09287	0,09198	0,09109	0,09021	0,08934	0,08848	0,08762	0,08677	0,08593
-20	0,10326	0,10227	0,10130	0,10033	0,09937	0,09841	0,09747	0,09653	0,09561	0,09469
-19	0,11362	0,11254	0,11147	0,11041	0,10937	0,10833	0,10729	0,10627	0,10526	0,10426
-18	0,12492	0,12375	0,12258	0,12143	0,12028	0,11915	0,11802	0,11691	0,11580	0,11470
-17	0,13725	0,13597	0,13470	0,13344	0,13219	0,13095	0,12972	0,12851	0,12730	0,12611
-16	0,15068	0,14928	0,14790	0,14653	0,14517	0,14382	0,14248	0,14116	0,13984	0,13854
-15	0,16530	0,16378	0,16228	0,16078	0,15930	0,15783	0,15638	0,15493	0,15350	0,15208
-14	0,18121	0,17956	0,17792	0,17630	0,17469	0,17309	0,17151	0,16993	0,16838	0,16683
-13	0,19852	0,19672	0,19494	0,19317	0,19142	0,18969	0,18796	0,18625	0,18456	0,18288
-12	0,21732	0,21537	0,21344	0,21152	0,20961	0,20773	0,20585	0,20400	0,20216	0,20033
-11	0,23774	0,23562	0,23352	0,23144	0,22937	0,22732	0,22529	0,22327	0,22127	0,21929
-10	0,25990	0,25760	0,25533	0,25306	0,25082	0,24860	0,24639	0,24420	0,24203	0,23988
-9	0,28394	0,28144	0,27897	0,27652	0,27409	0,27168	0,26928	0,26691	0,26456	0,26222
-8	0,30998	0,30728	0,30461	0,30195	0,29931	0,29670	0,29410	0,29153	0,28898	0,28645
-7	0,33819	0,33527	0,33237	0,32949	0,32664	0,32381	0,32100	0,31821	0,31545	0,31270
-6	0,36873	0,36557	0,36243	0,35932	0,35623	0,35316	0,35012	0,34710	0,34411	0,34114
-5	0,40176	0,39834	0,39495	0,39158	0,38824	0,38492	0,38163	0,37837	0,37513	0,37192
-4	0,43748	0,43378	0,43011	0,42647	0,42286	0,41927	0,41572	0,41219	0,40869	0,40521
-3	0,47606	0,47206	0,46810	0,46417	0,46027	0,45639	0,45255	0,44874	0,44496	0,44120
-2	0,51772	0,51341	0,50913	0,50488	0,50067	0,49649	0,49234	0,48822	0,48414	0,48008
-1	0,56267	0,55802	0,55341	0,54883	0,54428	0,53977	0,53529	0,53085	0,52644	0,52206
0	0,61115	0,60614	0,60116	0,59622	0,59132	0,58646	0,58163	0,57683	0,57208	0,56736
0	0,6112	0,6157	0,6202	0,6247	0,6292	0,6338	0,6384	0,6430	0,6477	0,6524
1	0,6571	0,6618	0,6666	0,6714	0,6763	0,6811	0,6860	0,6910	0,6959	0,7009
2	0,7060	0,7110	0,7161	0,7212	0,7264	0,7316	0,7368	0,7421	0,7474	0,7527
3	0,7580	0,7634	0,7688	0,7743	0,7798	0,7853	0,7909	0,7965	0,8021	0,8078

Продовження додатка 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	0,8135	0,8192	0,8250	0,8308	0,8366	0,8425	0,8484	0,8544	0,8604	0,8664
5	0,8725	0,8786	0,8847	0,8909	0,8971	0,9034	0,9097	0,9160	0,9224	0,9288
6	0,9352	0,9417	0,9483	0,9548	0,9614	0,9681	0,9748	0,9815	0,9883	0,9951
7	1,0020	1,0089	1,0158	1,0228	1,0298	1,0369	1,0440	1,0511	1,0583	1,0656
8	1,0728	1,0802	1,0875	1,0950	1,1024	1,1099	1,1175	1,1251	1,1327	1,1404
9	1,1481	1,1559	1,1637	1,1716	1,1795	1,1875	1,1955	1,2035	1,2116	1,2198
10	1,2280	1,2362	1,2445	1,2529	1,2613	1,2697	1,2782	1,2868	1,2954	1,3040
11	1,3127	1,3215	1,3303	1,3391	1,3481	1,3570	1,3660	1,3751	1,3842	1,3934
12	1,4026	1,4119	1,4212	1,4306	1,4400	1,4495	1,4591	1,4687	1,4783	1,4880
13	1,4978	1,5076	1,5175	1,5275	1,5375	1,5475	1,5576	1,5678	1,5780	1,5883
14	1,5987	1,6091	1,6195	1,6301	1,6407	1,6513	1,6620	1,6728	1,6836	1,6945
15	1,7054	1,7165	1,7275	1,7387	1,7499	1,7611	1,7725	1,7839	1,7953	1,8069
16	1,8184	1,8301	1,8418	1,8536	1,8654	1,8774	1,8893	1,9014	1,9135	1,9257
17	1,9379	1,9503	1,9627	1,9751	1,9876	2,0002	2,0129	2,0257	2,0385	2,0513
18	2,0643	2,0773	2,0904	2,1036	2,1168	2,1301	2,1435	2,1570	2,1705	2,1841
19	2,1978	2,2116	2,2254	2,2393	2,2533	2,2673	2,2815	2,2957	2,3100	2,3244
20	2,3388	2,3533	2,3679	2,3826	2,3974	2,4122	2,4272	2,4422	2,4572	2,4724
21	2,4877	2,5030	2,5184	2,5339	2,5495	2,5652	2,5809	2,5967	2,6127	2,6287
22	2,6448	2,6609	2,6772	2,6935	2,7100	2,7265	2,7431	2,7598	2,7766	2,7935
23	2,8104	2,8275	2,8446	2,8619	2,8792	2,8966	2,9141	2,9318	2,9495	2,9672
24	2,9851	3,0031	3,0212	3,0393	3,0576	3,0760	3,0944	3,1130	3,1316	3,1504
25	3,1692	3,1882	3,2072	3,2263	3,2456	3,2649	3,2844	3,3039	3,3235	3,3433
26	3,3631	3,3831	3,4031	3,4233	3,4435	3,4639	3,4844	3,5050	3,5256	3,5464
27	3,5673	3,5883	3,6094	3,6306	3,6520	3,6734	3,6949	3,7166	3,7383	3,7602
28	3,7822	3,8043	3,8265	3,8488	3,8713	3,8938	3,9165	3,9393	3,9622	3,9852
29	4,0083	4,0315	4,0549	4,0784	4,1020	4,1257	4,1495	4,1735	4,1975	4,2217
30	4,2460	4,2705	4,2950	4,3197	4,3445	4,3694	4,3945	4,4197	4,4450	4,4704
31	4,4959	4,5216	4,5474	4,5734	4,5994	4,6256	4,6519	4,6784	4,7050	4,7317
32	4,7585	4,7855	4,8126	4,8399	4,8672	4,8948	4,9224	4,9502	4,9781	5,0062
33	5,0343	5,0627	5,0911	5,1197	5,1485	5,1774	5,2064	5,2356	5,2649	5,2943
34	5,3239	5,3537	5,3835	5,4136	5,4437	5,4740	5,5045	5,5351	5,5659	5,5968
35	5,6278	5,6590	5,6904	5,7219	5,7535	5,7853	5,8173	5,8494	5,8817	5,9141
36	5,9466	5,9794	6,0122	6,0453	6,0785	6,1118	6,1453	6,1790	6,2128	6,2468
37	6,2810	6,3153	6,3498	6,3844	6,4192	6,4542	6,4893	6,5246	6,5601	6,5957
38	6,6315	6,6674	6,7036	6,7399	6,7763	6,8130	6,8498	6,8868	6,9239	6,9612
39	6,9987	7,0364	7,0743	7,1123	7,1505	7,1889	7,2274	7,2662	7,3051	7,3442
40	7,3835	7,4229	7,4626	7,5024	7,5424	7,5826	7,6229	7,6635	7,7042	7,7452
41	7,7863	7,8276	7,8691	7,9108	7,9527	7,9947	8,0370	8,0794	8,1221	8,1649
42	8,2080	8,2512	8,2946	8,3382	8,3821	8,4261	8,4703	8,5147	8,5593	8,6042
43	8,6492	8,6944	8,7398	8,7855	8,8313	8,8773	8,9236	8,9701	9,0167	9,0636
44	9,1107	9,1580	9,2055	9,2532	9,3011	9,3493	9,3976	9,4462	9,4950	9,5440
45	9,5932	9,6427	9,6923	9,7422	9,7923	9,8426	9,8932	9,9439	9,9949	10,0462
46	10,0976	10,1493	10,2012	10,2533	10,3056	10,3582	10,4110	10,4641	10,5174	10,5709
47	10,6246	10,6786	10,7328	10,7873	10,8419	10,8969	10,9520	11,0074	11,0631	11,1190
48	11,1751	11,2315	11,2881	11,3449	11,4020	11,4594	11,5170	11,5748	11,6329	11,6913
49	11,7499	11,8087	11,8678	11,9272	11,9868	12,0467	12,1068	12,1672	12,2278	12,2887
50	12,3499	12,4113	12,4730	12,5349	12,5971	12,6596	12,7223	12,7853	12,8486	12,9121
51	12,9759	13,0400	13,1043	13,1690	13,2338	13,2990	13,3645	13,4302	13,4962	13,5624
52	13,6290	13,6958	13,7629	13,8303	13,8980	13,9659	14,0342	14,1027	14,1715	14,2406
53	14,3100	14,3797	14,4496	14,5199	14,5904	14,6613	14,7324	14,8038	14,8755	14,9476
54	15,0199	15,0925	15,1654	15,2387	15,3122	15,3860	15,4601	15,5346	15,6093	15,6844
55	15,7597	15,8354	15,9113	15,9876	16,0642	16,1411	16,2184	16,2959	16,3738	16,4519
56	16,5304	16,6093	16,6884	16,7678	16,8476	16,9277	17,0082	17,0889	17,1700	17,2514

Продовження додатка 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
57	17,3331	17,4152	17,4976	17,5803	17,6634	17,7468	17,8305	17,9146	17,9990	18,0838
58	18,1689	18,2543	18,3401	18,4262	18,5126	18,5994	18,6866	18,7741	18,8619	18,9501
59	19,0387	19,1276	19,2168	19,3065	19,3964	19,4867	19,5774	19,6685	19,7599	19,8516
60	19,9438	20,0362	20,1291	20,2223	20,3159	20,4099	20,5042	20,5989	20,6940	20,7894

Додаток 2

**Вологовміст насиченого вологого повітря
за барометричного тиску 99 кПа**

Температура °C	Десяті долі, °C									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-40	0,0807	0,0798	0,0789	0,0780	0,0771	0,0763	0,0754	0,0746	0,0737	0,0729
-39	0,0903	0,0893	0,0883	0,0873	0,0864	0,0854	0,0844	0,0835	0,0826	0,0816
-38	0,1010	0,0999	0,0988	0,0977	0,0966	0,0955	0,0945	0,0934	0,0924	0,0914
-37	0,1129	0,1116	0,1104	0,1092	0,1080	0,1068	0,1056	0,1044	0,1033	0,1022
-36	0,1260	0,1246	0,1232	0,1219	0,1206	0,1192	0,1179	0,1166	0,1154	0,1141
-35	0,1405	0,1389	0,1374	0,1360	0,1345	0,1330	0,1316	0,1302	0,1287	0,1273
-34	0,1565	0,1548	0,1531	0,1515	0,1499	0,1483	0,1467	0,1451	0,1435	0,1420
-33	0,1742	0,1723	0,1705	0,1687	0,1669	0,1651	0,1634	0,1616	0,1599	0,1582
-32	0,1937	0,1917	0,1896	0,1876	0,1857	0,1837	0,1818	0,1798	0,1779	0,1760
-31	0,2152	0,2130	0,2108	0,2085	0,2064	0,2042	0,2021	0,1999	0,1978	0,1958
-30	0,2389	0,2365	0,2340	0,2316	0,2292	0,2268	0,2244	0,2221	0,2198	0,2175
-29	0,2650	0,2623	0,2596	0,2569	0,2543	0,2517	0,2491	0,2465	0,2440	0,2414
-28	0,2937	0,2907	0,2878	0,2848	0,2819	0,2790	0,2762	0,2734	0,2706	0,2678
-27	0,3253	0,3220	0,3187	0,3155	0,3123	0,3091	0,3060	0,3029	0,2998	0,2968
-26	0,3599	0,3563	0,3527	0,3492	0,3457	0,3422	0,3387	0,3353	0,3319	0,3286
-25	0,3979	0,3939	0,3900	0,3861	0,3823	0,3785	0,3747	0,3709	0,3672	0,3635
-24	0,4395	0,4352	0,4309	0,4266	0,4224	0,4182	0,4141	0,4100	0,4059	0,4019
-23	0,4852	0,4804	0,4757	0,4710	0,4664	0,4618	0,4573	0,4528	0,4483	0,4439
-22	0,5351	0,5299	0,5248	0,5196	0,5146	0,5096	0,5046	0,4997	0,4948	0,4900
-21	0,5897	0,5840	0,5784	0,5728	0,5673	0,5618	0,5564	0,5510	0,5456	0,5404
-20	0,6494	0,6432	0,6371	0,6310	0,6249	0,6189	0,6130	0,6071	0,6013	0,5955
-19	0,7147	0,7079	0,7012	0,6945	0,6879	0,6813	0,6748	0,6684	0,6620	0,6557
-18	0,7858	0,7784	0,7711	0,7638	0,7566	0,7495	0,7424	0,7354	0,7284	0,7215
-17	0,8635	0,8554	0,8474	0,8395	0,8316	0,8238	0,8161	0,8084	0,8008	0,7933
-16	0,9481	0,9393	0,9306	0,9220	0,9134	0,9049	0,8965	0,8881	0,8798	0,8716
-15	1,0403	1,0307	1,0212	1,0118	1,0025	0,9932	0,9840	0,9749	0,9659	0,9570
-14	1,1406	1,1302	1,1199	1,1096	1,0995	1,0894	1,0794	1,0695	1,0597	1,0499
-13	1,2498	1,2384	1,2272	1,2161	1,2050	1,1941	1,1832	1,1724	1,1617	1,1511
-12	1,3684	1,3561	1,3439	1,3318	1,3198	1,3079	1,2960	1,2843	1,2727	1,2612
-11	1,4973	1,4839	1,4707	1,4575	1,4445	1,4315	1,4187	1,4060	1,3933	1,3808
-10	1,6372	1,6227	1,6083	1,5940	1,5799	1,5658	1,5519	1,5381	1,5244	1,5108

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-9	1,7891	1,7733	1,7577	1,7422	1,7268	1,7116	1,6965	1,6815	1,6666	1,6519
-8	1,9537	1,9366	1,9197	1,9029	1,8862	1,8697	1,8533	1,8371	1,8209	1,8049
-7	2,1321	2,1136	2,0953	2,0771	2,0590	2,0411	2,0233	2,0057	1,9882	1,9709
-6	2,3253	2,3053	2,2855	2,2657	2,2462	2,2268	2,2076	2,1885	2,1695	2,1507
-5	2,5345	2,5128	2,4913	2,4700	2,4488	2,4279	2,4070	2,3864	2,3659	2,3455
-4	2,7608	2,7373	2,7141	2,6910	2,6681	2,6454	2,6229	2,6005	2,5783	2,5563
-3	3,0054	2,9801	2,9550	2,9300	2,9053	2,8807	2,8564	2,8322	2,8082	2,7844
-2	3,2698	3,2425	3,2153	3,1884	3,1616	3,1351	3,1087	3,0826	3,0567	3,0310
-1	3,5554	3,5258	3,4965	3,4674	3,4385	3,4099	3,3814	3,3532	3,3252	3,2974
0	3,8636	3,8317	3,8001	3,7687	3,7375	3,7066	3,6759	3,6454	3,6152	3,5852
0	3,8640	3,8923	3,9209	3,9496	3,9785	4,0076	4,0368	4,0663	4,0960	4,1258
1	4,1559	4,1861	4,2165	4,2472	4,2780	4,3090	4,3403	4,3717	4,4033	4,4352
2	4,4672	4,4995	4,5320	4,5646	4,5975	4,6306	4,6639	4,6975	4,7312	4,7652
3	4,7993	4,8337	4,8683	4,9032	4,9382	4,9735	5,0090	5,0447	5,0807	5,1169
4	5,1533	5,1899	5,2268	5,2639	5,3013	5,3389	5,3767	5,4148	5,4531	5,4916
5	5,5304	5,5695	5,6087	5,6483	5,6881	5,7281	5,7684	5,8089	5,8497	5,8907
6	5,9320	5,9736	6,0154	6,0575	6,0998	6,1424	6,1853	6,2285	6,2719	6,3156
7	6,3595	6,4037	6,4482	6,4930	6,5381	6,5834	6,6290	6,6749	6,7211	6,7676
8	6,8143	6,8614	6,9087	6,9563	7,0042	7,0525	7,1010	7,1498	7,1989	7,2483
9	7,2980	7,3480	7,3984	7,4490	7,4999	7,5512	7,6027	7,6546	7,7068	7,7593
10	7,8122	7,8653	7,9188	7,9726	8,0268	8,0812	8,1360	8,1912	8,2466	8,3024
11	8,3586	8,4150	8,4718	8,5290	8,5865	8,6444	8,7026	8,7611	8,8200	8,8793
12	8,9389	8,9989	9,0592	9,1199	9,1809	9,2424	9,3042	9,3663	9,4289	9,4918
13	9,5551	9,6187	9,6828	9,7472	9,8120	9,8772	9,9428	10,0087	10,0751	10,1419
14	10,2090	10,2766	10,3445	10,4129	10,4817	10,5508	10,6204	10,6904	10,7608	10,8316
15	10,9029	10,9745	11,0466	11,1191	11,1920	11,2654	11,3392	11,4134	11,4881	11,5632
16	11,6387	11,7147	11,7911	11,8680	11,9453	12,0231	12,1014	12,1801	12,2592	12,3388
17	12,4189	12,4994	12,5805	12,6620	12,7439	12,8264	12,9093	12,9927	13,0766	13,1609
18	13,2458	13,3311	13,4170	13,5033	13,5902	13,6775	13,7654	13,8537	13,9426	14,0320
19	14,1219	14,2123	14,3032	14,3947	14,4867	14,5792	14,6723	14,7658	14,8600	14,9546
20	15,0498	15,1456	15,2419	15,3388	15,4362	15,5341	15,6327	15,7318	15,8314	15,9316
21	16,0324	16,1338	16,2358	16,3383	16,4414	16,5451	16,6494	16,7543	16,8598	16,9659
22	17,0726	17,1799	17,2878	17,3964	17,5055	17,6152	17,7256	17,8366	17,9483	18,0605
23	18,1734	18,2870	18,4012	18,5160	18,6315	18,7476	18,8644	18,9818	19,0999	19,2187
24	19,3381	19,4583	19,5790	19,7005	19,8227	19,9455	20,0690	20,1933	20,3182	20,4438
25	20,5701	20,6972	20,8249	20,9534	21,0826	21,2125	21,3431	21,4745	21,6066	21,7394
26	21,8730	22,0074	22,1424	22,2783	22,4149	22,5522	22,6904	22,8293	22,9689	23,1094
27	23,2506	23,3926	23,5354	23,6790	23,8234	23,9686	24,1147	24,2615	24,4091	24,5576
28	24,7069	24,8570	25,0079	25,1597	25,3123	25,4658	25,6201	25,7753	25,9313	26,0882
29	26,2460	26,4047	26,5642	26,7246	26,8859	27,0481	27,2111	27,3751	27,5400	27,7058
30	27,8725	28,0401	28,2087	28,3782	28,5486	28,7200	28,8923	29,0655	29,2398	29,4149
31	29,5911	29,7682	29,9463	30,1253	30,3054	30,4864	30,6684	30,8515	31,0355	31,2206
32	31,4066	31,5937	31,7819	31,9710	32,1612	32,3525	32,5447	32,7381	32,9325	33,1280
33	33,3245	33,5221	33,7209	33,9207	34,1216	34,3236	34,5267	34,7309	34,9362	35,1427
34	35,3503	35,5590	35,7689	35,9799	36,1921	36,4054	36,6199	36,8356	37,0525	37,2705
35	37,4898	37,7102	37,9319	38,1548	38,3789	38,6042	38,8307	39,0585	39,2875	39,5178
36	39,7494	39,9822	40,2163	40,4516	40,6883	40,9262	41,1655	41,4060	41,6479	41,8911
37	42,1356	42,3815	42,6287	42,8772	43,1272	43,3785	43,6311	43,8852	44,1406	44,3974
38	44,6556	44,9153	45,1764	45,4388	45,7028	45,9681	46,2350	46,5033	46,7730	47,0442

Продовження додатка 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
39	47,3169	47,5912	47,8669	48,1441	48,4228	48,7031	48,9849	49,2682	49,5531	49,8395
40	50,1275	50,4171	50,7083	51,0011	51,2955	51,5915	51,8891	52,1883	52,4892	52,7918
41	53,0960	53,4018	53,7094	54,0186	54,3295	54,6422	54,9565	55,2726	55,5904	55,9100
42	56,2313	56,5544	56,8793	57,2059	57,5344	57,8646	58,1967	58,5306	58,8663	59,2039
43	59,5433	59,8846	60,2278	60,5729	60,9199	61,2688	61,6196	61,9724	62,3271	62,6838
44	63,0424	63,4030	63,7656	64,1303	64,4969	64,8656	65,2363	65,6090	65,9838	66,3607
45	66,7397	67,1208	67,5040	67,8893	68,2768	68,6664	69,0582	69,4521	69,8483	70,2466
46	70,6472	71,0500	71,4550	71,8623	72,2719	72,6837	73,0979	73,5143	73,9331	74,3542
47	74,7777	75,2035	75,6318	76,0624	76,4954	76,9308	77,3687	77,8091	78,2519	78,6972
48	79,1450	79,5953	80,0482	80,5036	80,9616	81,4221	81,8852	82,3510	82,8194	83,2904
49	83,7641	84,2404	84,7195	85,2012	85,6857	86,1729	86,6629	87,1557	87,6513	88,1497
50	88,6509	89,1549	89,6619	90,1717	90,6844	91,2001	91,7186	92,2402	92,7647	93,2922
51	93,8228	94,3564	94,8930	95,4327	95,9755	96,5215	97,0705	97,6228	98,1782	98,7368
52	99,299	99,864	100,432	101,004	101,579	102,157	102,738	103,323	103,912	104,503
53	105,099	105,697	106,299	106,905	107,514	108,127	108,743	109,363	109,987	110,614
54	111,245	111,880	112,518	113,160	113,806	114,456	115,109	115,766	116,428	117,093
55	117,762	118,435	119,112	119,793	120,478	121,167	121,861	122,558	123,260	123,965
56	124,676	125,390	126,108	126,831	127,558	128,290	129,026	129,766	130,511	131,261
57	132,014	132,773	133,536	134,304	135,076	135,853	136,635	137,422	138,213	139,009
58	139,810	140,616	141,427	142,243	143,064	143,890	144,721	145,557	146,399	147,246
59	148,097	148,955	149,817	150,685	151,558	152,437	153,321	154,211	155,106	156,007
60	156,914	157,826	158,744	159,668	160,598	161,533	162,475	163,423	164,376	165,336

Додаток 3

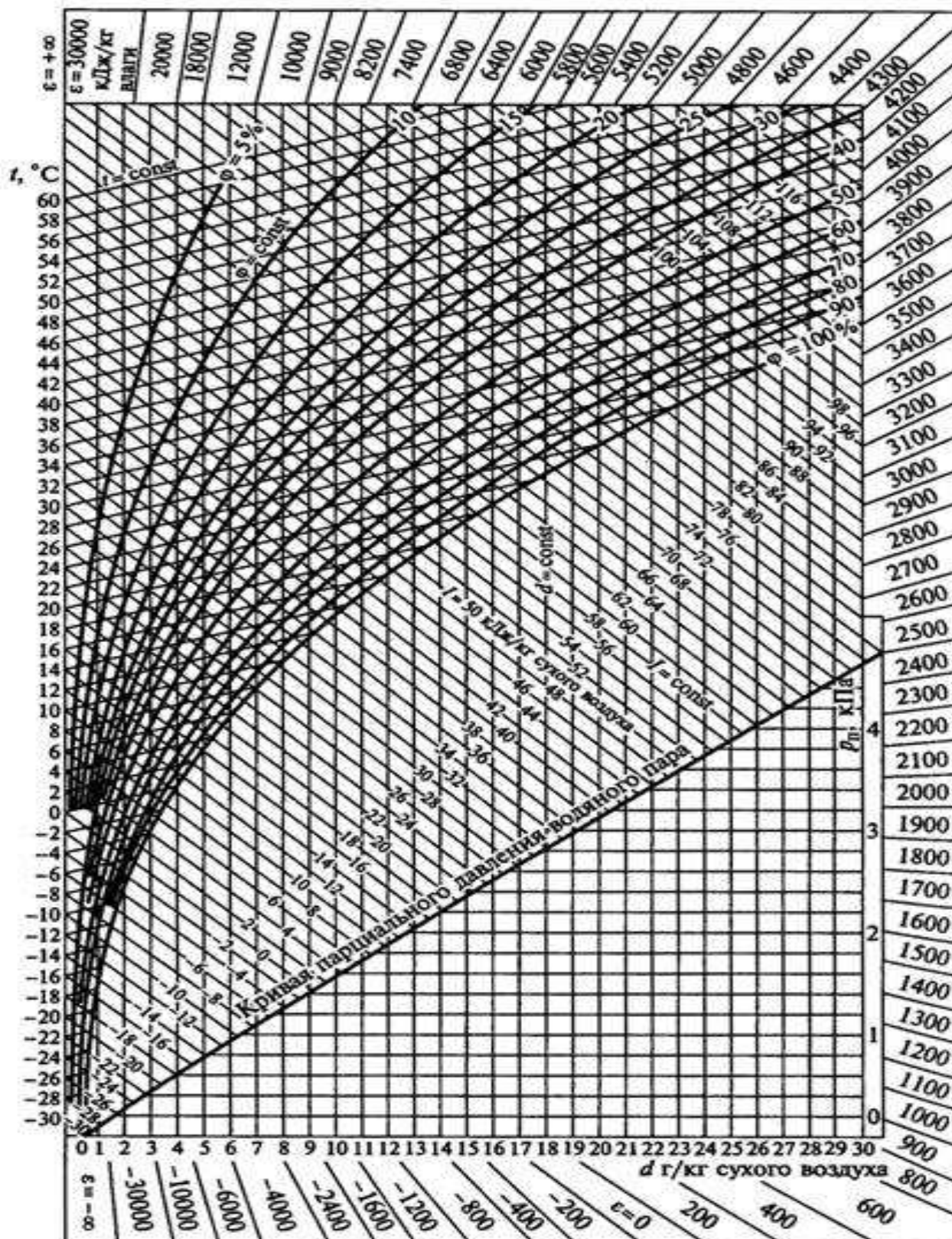
**Вологовміст насиченого вологого повітря
за барометричного тиску 101 кПа**

Температура °C	Десяті частки, °C									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-40	0,0791	0,0782	0,0773	0,0765	0,0756	0,0748	0,0739	0,0731	0,0722	0,0714
-39	0,0886	0,0876	0,0866	0,0856	0,0847	0,0837	0,0828	0,0818	0,0809	0,0800
-38	0,0990	0,0979	0,0968	0,0958	0,0947	0,0937	0,0926	0,0916	0,0906	0,0896
-37	0,1106	0,1094	0,1082	0,1070	0,1058	0,1047	0,1035	0,1024	0,1012	0,1001
-36	0,1235	0,1221	0,1208	0,1195	0,1182	0,1169	0,1156	0,1143	0,1131	0,1118
-35	0,1377	0,1362	0,1347	0,1333	0,1318	0,1304	0,1290	0,1276	0,1262	0,1248
-34	0,1534	0,1517	0,1501	0,1485	0,1469	0,1453	0,1438	0,1422	0,1407	0,1392
-33	0,1707	0,1689	0,1671	0,1653	0,1636	0,1618	0,1601	0,1584	0,1567	0,1550
-32	0,1899	0,1879	0,1859	0,1839	0,1820	0,1801	0,1782	0,1763	0,1744	0,1726
-31	0,2110	0,2088	0,2066	0,2044	0,2023	0,2002	0,1981	0,1960	0,1939	0,1919
-30	0,2342	0,2318	0,2294	0,2270	0,2246	0,2223	0,2200	0,2177	0,2154	0,2132
-29	0,2598	0,2571	0,2545	0,2519	0,2493	0,2467	0,2441	0,2416	0,2391	0,2367
-28	0,2879	0,2850	0,2821	0,2792	0,2763	0,2735	0,2707	0,2679	0,2652	0,2625

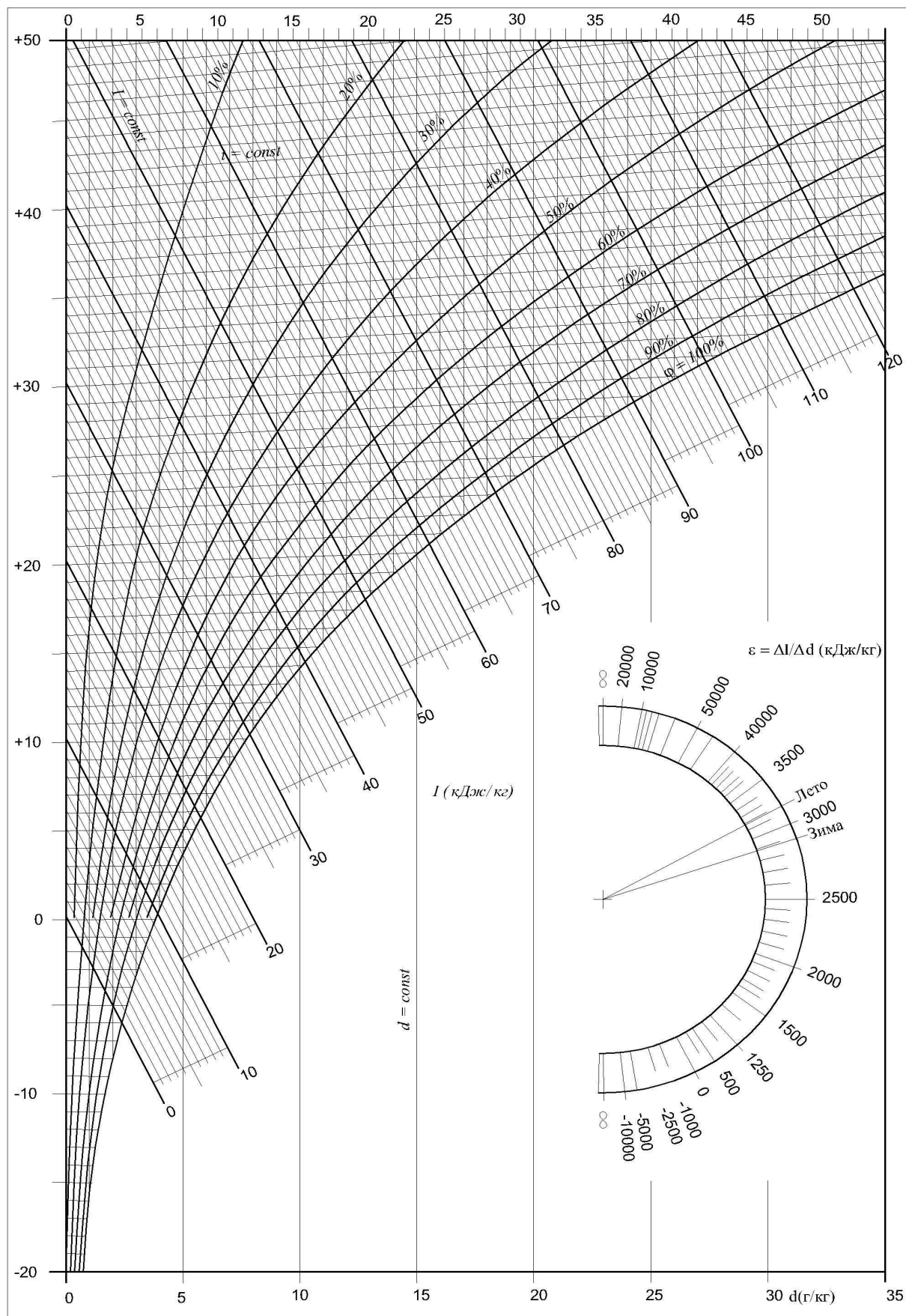
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-27	0,3188	0,3156	0,3124	0,3092	0,3061	0,3030	0,2999	0,2969	0,2939	0,2909
-26	0,3528	0,3492	0,3457	0,3423	0,3388	0,3354	0,3320	0,3287	0,3254	0,3221
-25	0,3900	0,3861	0,3823	0,3785	0,3747	0,3710	0,3673	0,3636	0,3599	0,3563
-24	0,4308	0,4266	0,4224	0,4182	0,4140	0,4099	0,4059	0,4019	0,3979	0,3939
-23	0,4755	0,4709	0,4663	0,4617	0,4572	0,4527	0,4482	0,4438	0,4395	0,4351
-22	0,5245	0,5194	0,5144	0,5093	0,5044	0,4995	0,4946	0,4898	0,4850	0,4802
-21	0,5780	0,5725	0,5670	0,5615	0,5561	0,5507	0,5453	0,5401	0,5348	0,5296
-20	0,6366	0,6305	0,6244	0,6185	0,6125	0,6067	0,6008	0,5951	0,5893	0,5837
-19	0,7005	0,6938	0,6873	0,6807	0,6743	0,6678	0,6615	0,6552	0,6489	0,6427
-18	0,7703	0,7630	0,7558	0,7487	0,7416	0,7346	0,7277	0,7208	0,7140	0,7072
-17	0,8464	0,8385	0,8306	0,8228	0,8151	0,8075	0,7999	0,7924	0,7850	0,7776
-16	0,9293	0,9207	0,9122	0,9037	0,8953	0,8870	0,8787	0,8705	0,8624	0,8543
-15	1,0197	1,0103	1,0010	0,9917	0,9826	0,9735	0,9645	0,9556	0,9468	0,9380
-14	1,1180	1,1078	1,0977	1,0876	1,0777	1,0678	1,0580	1,0483	1,0387	1,0291
-13	1,2250	1,2139	1,2029	1,1919	1,1811	1,1704	1,1597	1,1492	1,1387	1,1283
-12	1,3412	1,3292	1,3172	1,3053	1,2936	1,2819	1,2703	1,2588	1,2475	1,2362
-13	1,2250	1,2139	1,2029	1,1919	1,1811	1,1704	1,1597	1,1492	1,1387	1,1283
-12	1,3412	1,3292	1,3172	1,3053	1,2936	1,2819	1,2703	1,2588	1,2475	1,2362
-11	1,4676	1,4545	1,4415	1,4286	1,4158	1,4031	1,3905	1,3781	1,3657	1,3534
-10	1,6047	1,5905	1,5764	1,5624	1,5485	1,5347	1,5211	1,5075	1,4941	1,4808
-9	1,7535	1,7381	1,7228	1,7076	1,6925	1,6776	1,6628	1,6481	1,6335	1,6191
-8	1,9149	1,8982	1,8816	1,8651	1,8488	1,8326	1,8165	1,8006	1,7848	1,7691
-7	2,0897	2,0716	2,0536	2,0358	2,0181	2,0006	1,9831	1,9659	1,9487	1,9317
-6	2,2791	2,2595	2,2400	2,2207	2,2016	2,1825	2,1637	2,1450	2,1264	2,1080
-5	2,4841	2,4629	2,4418	2,4209	2,4002	2,3796	2,3592	2,3389	2,3188	2,2989
-4	2,7059	2,6829	2,6601	2,6375	2,6151	2,5928	2,5707	2,5488	2,5271	2,5055
-3	2,9456	2,9208	2,8962	2,8717	2,8475	2,8234	2,7995	2,7759	2,7523	2,7290
-2	3,2047	3,1779	3,1513	3,1249	3,0987	3,0727	3,0469	3,0213	2,9959	2,9707
-1	3,4846	3,4556	3,4269	3,3984	3,3701	3,3420	3,3141	3,2864	3,2590	3,2318
0	3,7867	3,7554	3,7244	3,6936	3,6631	3,6327	3,6027	3,5728	3,5432	3,5138
0	3,7870	3,8148	3,8427	3,8709	3,8992	3,9277	3,9564	3,9853	4,0143	4,0436
1	4,0730	4,1027	4,1325	4,1625	4,1927	4,2231	4,2537	4,2845	4,3155	4,3468
2	4,3782	4,4098	4,4416	4,4736	4,5058	4,5383	4,5709	4,6038	4,6368	4,6701
3	4,7036	4,7373	4,7712	4,8053	4,8397	4,8742	4,9090	4,9440	4,9793	5,0147
4	5,0504	5,0863	5,1225	5,1588	5,1954	5,2323	5,2693	5,3066	5,3442	5,3819
5	5,4200	5,4582	5,4967	5,5354	5,5744	5,6136	5,6531	5,6928	5,7328	5,7730
6	5,8135	5,8542	5,8952	5,9364	5,9779	6,0196	6,0616	6,1039	6,1464	6,1892
7	6,2323	6,2756	6,3192	6,3631	6,4073	6,4517	6,4964	6,5413	6,5866	6,6321
8	6,6779	6,7240	6,7704	6,8171	6,8640	6,9112	6,9588	7,0066	7,0547	7,1031
9	7,1518	7,2008	7,2501	7,2997	7,3497	7,3999	7,4504	7,5012	7,5524	7,6038
10	7,6556	7,7077	7,7601	7,8128	7,8658	7,9192	7,9729	8,0269	8,0812	8,1359
11	8,1909	8,2462	8,3018	8,3578	8,4142	8,4708	8,5279	8,5852	8,6429	8,7010
12	8,7594	8,8181	8,8772	8,9367	8,9965	9,0567	9,1172	9,1781	9,2394	9,3010
13	9,3630	9,4254	9,4881	9,5512	9,6147	9,6786	9,7428	9,8074	9,8724	9,9378
14	10,0036	10,0698	10,1364	10,2033	10,2707	10,3384	10,4066	10,4751	10,5441	10,6135
15	10,6833	10,7534	10,8240	10,8951	10,9665	11,0384	11,1106	11,1833	11,2565	11,3300
16	11,4040	11,4785	11,5533	11,6286	11,7044	11,7805	11,8572	11,9342	12,0118	12,0897
17	12,1682	12,2471	12,3264	12,4062	12,4865	12,5672	12,6484	12,7301	12,8123	12,8949
18	12,9780	13,0616	13,1457	13,2302	13,3153	13,4008	13,4869	13,5734	13,6604	13,7480

Продовження додатка 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
19	13,8360	13,9246	14,0136	14,1032	14,1933	14,2839	14,3750	14,4667	14,5588	14,6515
20	14,7448	14,8385	14,9328	15,0277	15,1231	15,2190	15,3155	15,4125	15,5101	15,6083
21	15,7070	15,8062	15,9061	16,0065	16,1074	16,2090	16,3111	16,4138	16,5171	16,6210
22	16,7255	16,8305	16,9362	17,0424	17,1493	17,2568	17,3648	17,4735	17,5828	17,6927
23	17,8033	17,9144	18,0262	18,1386	18,2517	18,3654	18,4797	18,5947	18,7103	18,8266
24	18,9435	19,0611	19,1794	19,2983	19,4179	19,5381	19,6591	19,7807	19,9030	20,0259
25	20,1496	20,2740	20,3990	20,5248	20,6512	20,7784	20,9063	21,0349	21,1642	21,2942
26	21,4250	21,5565	21,6887	21,8217	21,9554	22,0898	22,2250	22,3609	22,4976	22,6351
27	22,7733	22,9123	23,0521	23,1927	23,3340	23,4761	23,6190	23,7627	23,9072	24,0525
28	24,1986	24,3455	24,4932	24,6418	24,7911	24,9413	25,0923	25,2442	25,3969	25,5504
29	25,7048	25,8601	26,0161	26,1731	26,3309	26,4896	26,6492	26,8097	26,9710	27,1332
30	27,2964	27,4604	27,6253	27,7911	27,9579	28,1255	28,2941	28,4636	28,6341	28,8055
31	28,9778	29,1511	29,3253	29,5005	29,6766	29,8537	30,0318	30,2109	30,3909	30,5720
32	30,7540	30,9370	31,1210	31,3061	31,4921	31,6792	31,8673	32,0564	32,2466	32,4378
33	32,6300	32,8233	33,0177	33,2131	33,4096	33,6072	33,8058	34,0055	34,2064	34,4083
34	34,6113	34,8155	35,0207	35,2271	35,4346	35,6432	35,8530	36,0639	36,2760	36,4892
35	36,7036	36,9192	37,1359	37,3538	37,5730	37,7933	38,0148	38,2375	38,4615	38,6866
36	38,9130	39,1406	39,3695	39,5996	39,8310	40,0636	40,2975	40,5327	40,7691	41,0069
37	41,2459	41,4863	41,7279	41,9709	42,2152	42,4608	42,7078	42,9561	43,2058	43,4568
38	43,7092	43,9630	44,2182	44,4747	44,7327	44,9920	45,2528	45,5150	45,7786	46,0437
39	46,3102	46,5782	46,8476	47,1185	47,3909	47,6647	47,9401	48,2170	48,4953	48,7752
40	49,0566	49,3396	49,6241	49,9101	50,1977	50,4869	50,7777	51,0701	51,3640	51,6596
41	51,9567	52,2555	52,5560	52,8580	53,1618	53,4671	53,7742	54,0829	54,3934	54,7055
42	55,0193	55,3349	55,6522	55,9712	56,2920	56,6145	56,9388	57,2648	57,5927	57,9224
43	58,2538	58,5871	58,9222	59,2592	59,5980	59,9386	60,2812	60,6256	60,9719	61,3201
44	61,6703	62,0223	62,3763	62,7323	63,0902	63,4501	63,8119	64,1758	64,5416	64,9095
45	65,2794	65,6514	66,0254	66,4015	66,7796	67,1599	67,5422	67,9267	68,3132	68,7020
46	69,0928	69,4859	69,8811	70,2785	70,6781	71,0800	71,4840	71,8903	72,2989	72,7097
47	73,1229	73,5383	73,9560	74,3761	74,7985	75,2232	75,6504	76,0799	76,5118	76,9461
48	77,3828	77,8220	78,2636	78,7077	79,1543	79,6034	80,0551	80,5092	80,9659	81,4252
49	81,8870	82,3514	82,8185	83,2882	83,7605	84,2355	84,7131	85,1935	85,6765	86,1623
50	86,6509	87,1422	87,6362	88,1331	88,6328	89,1353	89,6407	90,1489	90,6600	91,1741
51	91,6910	92,2109	92,7338	93,2596	93,7885	94,3203	94,8552	95,3932	95,9342	96,4783
52	97,026	97,576	98,129	98,686	99,246	99,809	100,376	100,945	101,518	102,094
53	102,674	103,257	103,843	104,433	105,026	105,622	106,222	106,826	107,433	108,043
54	108,657	109,275	109,896	110,521	111,150	111,782	112,418	113,057	113,701	114,348
55	114,999	115,654	116,312	116,975	117,641	118,312	118,986	119,664	120,347	121,033
56	121,724	122,418	123,117	123,820	124,527	125,238	125,954	126,673	127,397	128,126
57	128,859	129,596	130,338	131,084	131,834	132,590	133,349	134,114	134,883	135,656
58	136,434	137,218	138,005	138,798	139,595	140,398	141,205	142,017	142,834	143,656
59	144,484	145,316	146,153	146,996	147,844	148,697	149,555	150,419	151,288	152,162
60	153,042	153,927	154,818	155,715	156,617	157,525	158,438	159,357	160,282	161,213

J-d діаграма вологого повітря

***J-d* діаграма вологого повітря**



НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки
до виконання курсового проекту
з дисципліни

«ВЕНТИЛЯЦІЯ»

Розділ

«Властивості вологого повітря і зображення процесів обробки повітря на J-d діаграмі»

(для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання і слухачів другої вищої освіти напряму підготовки 0921 (6.060101) “Будівництво”, спеціальності 7.092108, 7.06010107 “Теплогазопостачання і вентиляція”)

Укладач доц. ПРАНЦУЗ Оксана Сергіївна

Відповідальний за випуск О. В. Ромашко

Редактори: К. В. Дюкар, О. В. Тарасюк, С. В. Тимощук

Комп’ютерний набір О. С. Пранцуз

Комп’ютерне верстання І. В. Волосожарова

План 2010, поз. 127М

Підп. до друку 14.12.2011 р.
Друк на ризографі.
Тираж 50 пр.

Формат 60x84 1/16
Ум. друк. арк. 3,4
Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:
ДК № 4064 від 12.05.2011р.