

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання самостійної роботи студентів

з дисципліни

«Сушильні процеси та установки»

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання самостійної роботи студентів
з дисципліни
«Сушильні процеси та установки»

Електронне видання
комбінованого (локального та мережного) використання

Вінниця
ВНТУ
2020

Рекомендовано до видання Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 7 від 20.02.2020 р.)

Рецензенти:

В. В. Біліченко, доктор технічних наук, професор

І. В. Коц, кандидат технічних наук, професор

Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентів з дисципліни «Сушильні процеси та установки» [Електронний режим] / Укладач О. Ю. Співак. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 39 с.

В методичних вказівках до виконання самостійної роботи студентів наведено програму вивчення дисципліни «Сушильні процеси та установки» для студентів спеціальності 144 – Теплоенергетика. Подано теоретичний матеріал, необхідний для самостійної роботи студентів, завдання для самостійної роботи, перелік тестових контрольних запитань для самоперевірки, довідковий матеріал, перелік літератури для вивчення курсу.

ЗМІСТ

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	4
1.1 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни.....	4
1.2 Політика курсу.....	6
1.3 Система поточного, модульного та підсумкового контролю знань	6
2 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СУШИЛЬНИХ АГЕНТІВ.....	7
2.1 Розрахунки параметрів волого повітря.....	7
2.2 h-d діаграма вологого повітря	8
2.3 Завдання для самостійної роботи	10
3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОГОГО МАТЕРІАЛУ	12
3.1 Теоретичні відомості	12
3.2 Завдання для самостійної роботи	14
4 ПРОЦЕС В ТЕОРЕТИЧНІЙ СУШАРЦІ.....	15
4.1 Матеріальний баланс теоретичної сушарки.....	15
4.2 Тепловий баланс теоретичної сушарки.....	16
4.3 Розрахунок теоретичної сушарки за допомогою h–d діаграми.....	16
4.4 Завдання для самостійної роботи	18
5 ПРОЦЕС В ДІЙСНІЙ СУШАРЦІ.....	20
5.1 Рівняння теплового балансу дійсної сушарки.....	20
5.2 Побудова дійсного процесу сушіння в h-d діаграмі	23
5.3 Завдання для самостійної роботи	24
6 ІНТЕНСИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРОВУВАННЯ	25
6.1 Теоретичні відомості	25
6.2 Задачі для самостійної роботи	27
ДОДАТКИ.....	30
Додаток А – Діаграми вологого повітря.....	31
Додаток Б – Теплофізичні властивості води на лінії насичення.....	33
Додаток В – Теплофізичні властивості водяної пари на лінії насичення.....	34
Додаток Д – Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску	35
Додаток Е – Термодинамічні властивості вологого повітря	36
Додаток Ж – Теплофізичні властивості димових газів	38
Додаток И – Максимальна припустима швидкість газу на виході з сушарки	38

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Програма вивчення варіативної навчальної дисципліни складена з врахуванням вимог освітньо-професійних програм підготовки бакалаврів за спеціальністю 144 – «Теплоенергетика».

Метою викладання дисципліни «Сушильні процеси та установки» є формування знань і навичок, необхідних для проектування, модернізації і експлуатації сушильних комплексів промислових підприємств, основи сучасної технології сушіння, знайомство з основними методами сушіння різноманітної сировини, типовими конструкціями сушильної техніки і допоміжного обладнання.

Компетентності: здатність продемонструвати практичні інженерні навички при проектуванні та експлуатації теплоенергетичного обладнання.

Завдання вивчення цієї дисципліни як складової циклу дисциплін фундаментальної технічної підготовки полягає у формуванні в студентів навичок розрахунків технологічних нестационарних тепломасообмінних процесів і циклів.

Вивчаючи курс дисципліни студент повинен:

- **знати** закони сушіння, типові процеси сушіння та існуючі способи обезводнення різноманітної сировини, бути ознайомленим з сушильним і допоміжним обладнанням;
- **вміти** використовувати для розрахунків теплові діаграми робочих тіл, проводити аналіз теплотехнологічного процесу з точки зору поділу його на основні види теплообміну, виконувати інженерно-технічні розрахунки процесів сушіння, аналізувати отримані результати та приймати рішення за результатами цих розрахунків, користуватись науковою, нормативною та довідковою літературою, знаходити раціональні методи розв'язання практичних завдань.

1.1 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. Статика сушіння

Тема 1. Предмет та завдання дисципліни. Властивості вологого матеріалу

Вступ. Предмет та завдання дисципліни. Призначення сушіння. Історія розвитку сушильного виробництва. Етапи розвитку сушильного виробництва. Принципи процесу обезводнення. Основні методи і способи сушіння. Класифікація сушильної техніки за принципом дії. Класифікація форм зв'язку вологи в матеріалах. Енергія зв'язку вологи. Адсорбційно зв'язана

волога. Осмотичне утримання вологи. Волога макро- і мікрокапілярів. Хімічно зв'язана волога. Класифікація твердих вологих матеріалів за колоїдно-фізичними властивостями. Потенціал масоперенесення.

Тема 2. Властивості сушильних агентів

Способи сушіння. Повітря як сушильний агент. Питома витрата повітря на випаровування вологи. Властивості повітря. h - d діаграма вологого повітря. Процеси з вологим повітрям. Матеріальний баланс сушарки. Сушіння топковими газами. Переваги і недоліки різних сушильних агентів. Зміна теплофізичних характеристик сушильних агентів в процесі сушіння.

Змістовий модуль 2. Кінетика сушіння

Тема 3. Криві сушіння матеріалів

Криві сушіння, принципи їх побудови. Періоди сушіння. Період сушіння з постійною швидкістю. Період сушіння зі спадаючою швидкістю. Криві швидкості сушіння. Температурні криві сушіння. Ізотерми сорбції і десорбції. Рівноважна і гігроскопічна вологість. Критичний та кінцевий вологовміст.

Тема 4. Тепломасообмінні процеси при сушінні та їх математичний опис

Тепло- і масообмін в процесі сушіння. Коефіцієнт сушіння. Коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці парціальних тисків. Критерії Шервуда, Шмідта та Гухмана. Параметричний критерій. Вплив умов сушіння на процес сушіння. Кондуктивне сушіння. Тепло- і масообмін при кондуктивному сушінні. Теплообмін між поверхнею нагріву і киплячим шаром.

Змістовий модуль 3. Схеми процесу сушіння

Тема 5. Теоретична та дійсна сушарки

Теоретична сушарка. Побудова теоретичного процесу сушіння в h - d діаграмі вологого повітря. Дійсна сушарка. Побудова дійсного процесу сушіння в h - d діаграмі вологого повітря. Тепловий баланс сушарки.

Тема 6. Способи організації руху теплоносія в сушильній камері

Аналіз основних схем конвективного сушіння. Схема з однократною циркуляцією теплоносія. Схема з проміжним підігрівом. Схема з частковою рециркуляцією теплоносія. Схема з повною циркуляцією теплоносія. Альтернативні енергозберігаючі схеми руху теплоносія. Переваги та недоліки кожної з схем.

Змістовий модуль 4. Конструкції сушильної техніки

Тема 7. Сушарки періодичної дії

Характеристика сушарок за режимом роботи, за тиском в робочій ка-

мері, за видом сушильного агента, за способом переміщення сушильного агента. Конструктивні особливості різних типів сушарок. Камерні сушарки. Вакуум-сублимаційні сушарки. Вібросушарки. Сушіння під впливом енергетичних полів. Сушіння в електромагнітному полі. Терморадіаційне сушіння. Сушіння струмами високої частоти. Інфрачервоне сушіння. Сушіння в акустичному полі. Сушіння штучних і зернистих матеріалів в щільному шарі. Сушіння дисперсних матеріалів в псевдокиплячому шарі.

Тема 8. Сушарки неперервної дії

Конвеєрні сушильні установки. Будова і принцип роботи конвеєрних сушарок. Тунельні сушарки, їх будова, принцип роботи. Шахтні сушарки. Барабанні і контактні сушарки. Газові сушарки. Підвищення ефективності роботи конвеєрних і стрічкових сушарок. Питання експлуатації сушильної техніки. Підвищення ефективності роботи тунельних і шахтних сушарок. Підвищення ефективності роботи барабанних і контактних сушарок. Сушіння рідких матеріалів в розпиленому стані.

1.2 Політика курсу

Викладач та всі здобувачі, що вивчають цей курс, зобов'язуються дотримуватись таких положень:

- Кодекс етики ВНТУ,
- Положення про академічну доброчесність студентів та науково-педагогічних працівників ВНТУ,
- Положення про рейтингову систему оцінювання досягнень студентів у ВНТУ

та розуміють, що за їх порушення несуть особисту відповідальність.

1.3 Система поточного, модульного та підсумкового контролю знань

Контроль проводиться з метою визначення якості засвоєння навчального матеріалу, ступеня відповідності сформованих вмінь, знань і навичок меті та завданням, що ставляться при вивченні дисципліни «Сушильні процеси та установки». При викладанні дисципліни застосовуються такі види контролю: поточний, модульний, підсумковий.

Поточний контроль проводиться на практичних та лабораторних заняттях за результатами виконання індивідуальних завдань (для денної форми навчання), контрольних робіт (для заочної форми навчання), результатами виконання та захисту лабораторних робіт.

Модульний (проміжний) контроль проводиться для студентів денної форми навчання двічі за семестр у вигляді контрольних робіт та виконання тестових завдань в системі Jetiq і має своєю метою оцінювання рівня практичних і теоретичних знань та ступеня засвоєння навчального матеріалу

певних змістових модулів. При проведенні модульного контролю завдання для контрольних заходів носять комплексний характер і складаються з практичної і теоретичної частин.

Підсумковий (семестровий) контроль для студентів всіх форм навчання проводиться у вигляді контрольних робіт та виконання тестових завдань в системі JetIQ і має своєю метою оцінювання рівня практичних і теоретичних знань та ступеня засвоєння навчального матеріалу всього навчального курсу.

2 ПАРАМЕТРИ І ХАРАКТЕРИСТИКИ СУШИЛЬНИХ АГЕНТІВ

2.1 Розрахунки параметрів волого повітря

Основним сушильним агентом в атмосферних сушарках є підігріте вологе повітря.

Вологе повітря – це суміш сухого повітря і водяної пари. Оскільки повітря – це суміш, то згідно з законом Дальтона загальний тиск суміші є сумою парціальних тисків сухого повітря і водяної пари

$$P_{\text{вп}} = P_{\text{сп}} + P_{\text{п}}, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{сп}}$ – парціальний тиск сухого повітря, Па;

$P_{\text{п}}$ – парціальний тиск водяної пари, Па.

Максимальний парціальний тиск водяної пари при цій температурі називається тиском насичення і позначається $P_{\text{н}}$. Величина $P_{\text{н}}$ водяної пари у вологому повітрі визначається тільки температурою суміші та не залежить від тиску суміші $P_{\text{вп}}$. Вологе повітря, в якому парціальний тиск пари $P_{\text{п}}$ менший за $P_{\text{н}}$, називається ненасиченим. Якщо ненасичене вологе повітря охолоджувати при сталому тиску, то можна досягнути стану, при якому $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$. Вологе повітря у такому стані називається насиченим, тобто вологе повітря складається із сухого повітря і насиченої водяної пари. Температура вологого повітря, при якій $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$, називається температурою точки роси. При подальшому охолодженні насиченого повітря $P_{\text{п}}$ буде більшим за $P_{\text{н}}$, водяна пара стане вологою та почне конденсуватись (випадання роси).

Для характеристики пароповітряної суміші потрібно знати її склад. Склад суміші характеризують такі величини:

– абсолютна вологість повітря – кількість водяної пари в повітрі, яка міститься в одному кубічному метрі вологого повітря і позначається

$$\rho_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{V_{\text{вп}}}, \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right); \quad (2.2)$$

– відносна вологість повітря – відношення дійсної абсолютної вологості до максимальної абсолютної вологості при цій температурі

$$\varphi = \frac{\rho_{п}}{\rho_{н}} \cdot 100\%; \quad (2.3)$$

– вологовміст – відношення маси водяної пари, що міститься в повітрі, до маси сухого повітря

$$d = \frac{m_{п}}{m_{сп}}, \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right); \quad (2.4)$$

– ентальпія вологого повітря – визначається як сума ентальпій одного кілограма сухого повітря і одного кілограма водяної пари, помноженого на вологовміст

$$h_{вп} = h_{сп} + h_{п} \cdot d, \quad (2.5)$$

при практичних розрахунках можна користуватись формулою

$$h_{вп} = t + (2500 + 1,9 \cdot t) \cdot d, \quad (2.6)$$

де t – температура вологого повітря, °С.

На основі цього рівняння побудована h - d діаграма вологого повітря. Для практичних інженерних розрахунків термодинамічних процесів вологого повітря зручно користуватися h - d діаграмою вологого повітря.

2.2 h - d діаграма вологого повітря

Діаграма побудована для середнього атмосферного тиску $P_{атм} = 0,991$ МПа та з достатньою точністю може використовуватись для невеликих відхилень від цього тиску і для робочих тіл – продуктів згоряння. За початок координат взято точку, в якій $t = 0$ °С; $d = 0$ г/кг; $h = 0$ Дж/кг.

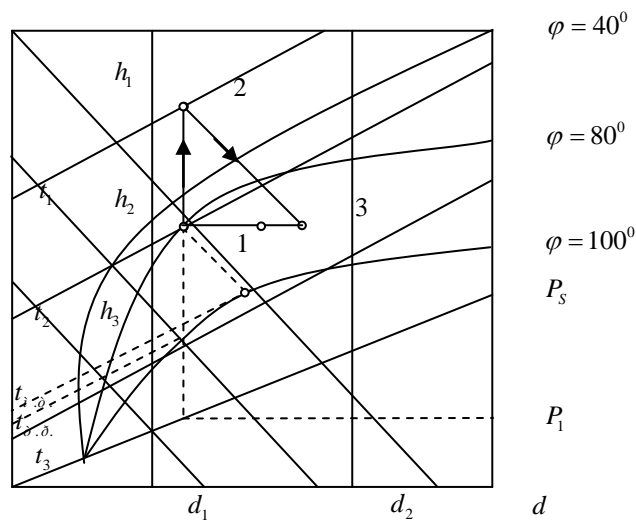


Рисунок 2.1 – Процеси в h - d діаграмі

На h-d діаграмі наносяться точки однакових вологовмістів, температур, ентальпій, відносної вологості, які потім сполучаються у відповідні криві. Діаграма повітря показана на рис. 2.2.

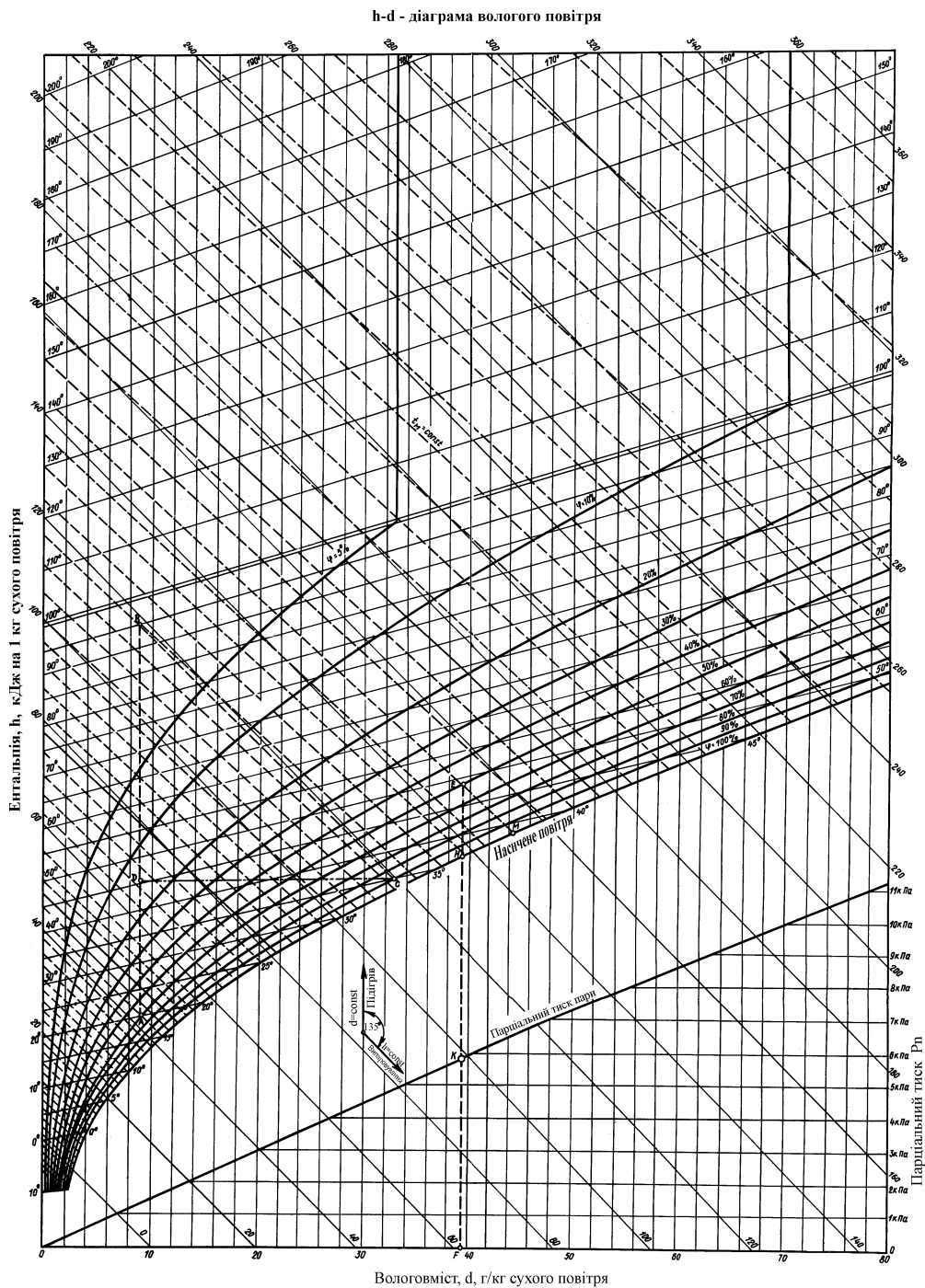


Рисунок 2.2 – h-d діаграма вологого повітря

За допомогою h-d діаграми можна виконати такі розрахунки.

1. За двома відомими параметрами стану вологого повітря можна знайти місцезнаходження точки, а отже і інші параметри (h , t , φ , d , P_n), всього їх п'ять.

2. Для знаходження парціального тиску водяної пари необхідно із заданої точки опустити вертикальну пряму до перетину з лінією P_n , з точки перетину по вертикалі пройти до правого поля діаграми, де прочитати парціальний тиск водяної пари.
3. Для кожного стану вологого повітря можна знайти температуру точки роси t_R . Для цього з заданої точки опустити вертикальну пряму до лінії $\varphi = 100\%$, і з точки перетину дійти по ізотермі до лівого поля діаграми. Можна визначити температуру мокрого термометра t_m . Для цього із цієї точки по ізентальпі пройти до перетину із лінією $\varphi = 100\%$ і далі по ізотермі до лівого поля діаграми ($t_m > t_R$).
4. Процес підігріву повітря у калорифері зображають вертикальною прямою, направленою вгору (1–2).
5. Процес випаровування вологи із осушувача, що відповідає зволоженню підігрітого повітря зображаються ізентальною, направленою вниз (2–3).
6. Якщо змішати два об'єми повітря V_1 і V_3 із різними параметрами, то точка 4, що характеризує параметри суміші, лежить на прямій, що з'єднує точку 1 і точку 3 та ділить цей відрізок обернено пропорційно об'ємам складових сумішей

$$\frac{1-4}{4-3} = \frac{V_3}{V_1}. \quad (2.7)$$

Ці переваги використовують для теплових розрахунків сушильних камер, систем вентиляцій та кондиціонування. Метою цих розрахунків є визначення кількостей повітря і теплоти.

2.3 Завдання для самостійної роботи

2.3.1 У скільки разів більше потрібно видалити вологи із 1 кг вологого матеріалу при висушуванні його від 50 до 25%, ніж від 2 до 1% вологості (рахуючи на загальну масу). В обох випадках надходить на сушіння 1 кг вологого матеріалу.

2.3.2 Знайти вологовміст і ентальпію повітря після сушіння для $t = 50$ °С і $\varphi = 0,7$.

2.3.3 Знайти вологовміст і відносну вологість пароповітряної суміші для 50 °С, якщо дано, що парціальний тиск водяної пари в суміші 10000 Па.

2.3.4 Знайти вміст водяної пари в суміші а) з повітрям, б) з воднем, в) з етаном (рахуючи на 1 кг сухого газу) для $t = 35$ °С і $\varphi = 0,45$. Загальний тиск $P_{абс.} = 103$ кПа.

2.3.5 Порівняти питому витрату теплоти та повітря в сушарці для літнього та зимового часу (в умовах Вінниці), якщо в обох випадках повітря,

яке виходить із сушарки, буде мати $t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi_2 = 0,6$. Сушарка теоретична, працює за нормальним сушильним варіантом. Характеристики стану повітря в різний час року: $t = -15,1\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 89\%$ для зимового періоду і $t = 19,3\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 69\%$ для літнього періоду.

2.3.6 Абсолютний тиск пароповітряної суміші за $150\text{ }^\circ\text{C}$ і відносної вологості $\varphi = 0,5$ становить 745 мм. рт. ст. . Знайти парціальні тиски водяної пари і повітря та вологовміст повітря.

2.3.7 Вологе повітря з температурою $130\text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi = 0,3$ знаходиться під тиском $P_{\text{абс}} = 700\text{ кПа}$. Знайти парціальний тиск повітря, його густину і вологовміст.

2.3.8 Яку кількість вологи винесе з собою повітря, яке надходить в сушарку в кількості 200 кг/год (рахуючи на абсолютно сухе повітря) з температурою $t_1 = 95\text{ }^\circ\text{C}$ ($P = 100\text{ кПа}$) та $\varphi_1 = 5\%$ і виходить після сушіння з $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi_2 = 60\%$.

2.3.9 Насичене вологе повітря з температурою $130\text{ }^\circ\text{C}$ знаходиться під абсолютним тиском $P = 700\text{ кПа}$. Знайти парціальний тиск водяної пари, густину вологого повітря та вологовміст повітря.

2.3.10 Знайти роботу витяжного вентилятора для сушарки, в якій із висушуваного матеріалу видаляється 100 кг/год вологи за таких умов: $t_0 = 15\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 0,8$, $t_2 = 45\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 0,6$, $P = 750\text{ мм. рт. ст.}$

2.3.11 Повітря перед потраплянням в сушарку підігрівається в калорифері до $113\text{ }^\circ\text{C}$. На виході із сушарки температура повітря $60\text{ }^\circ\text{C}$ та $\varphi_2 = 0,3$. Знайти точку роси зовнішнього повітря. Процес сушіння вважати теоретичним.

2.3.12 Температура повітря за сухим термометром $50\text{ }^\circ\text{C}$, за мокрим – $30\text{ }^\circ\text{C}$. Знайти всі характеристики повітря.

2.3.13 Знайти точку роси і відносну вологість повітря, яке виходить із сушарки, за показниками психрометра: $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $t_m = 35\text{ }^\circ\text{C}$.

2.3.14 Знайти температуру матеріалу в теоретичній сушарці (в першому періоді сушіння), якщо атмосферне повітря надходить в калорифер за $t_0 = 15\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi_0 = 0,8$ та нагрівається до $t_1 = 123\text{ }^\circ\text{C}$.

2.3.15 Визначити густину вологого повітря за $t = 40\text{ }^\circ\text{C}$ і $\varphi = 80\%$, якщо абсолютний тиск $P_{\text{абс}} = 100\text{ 000 Па}$.

2.3.16 Знайти ККД теоретичної сушарки, якщо стан повітря змінюється від $\varphi_0 = 0,7$ та $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ до $\varphi_2 = 0,6$ та $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$. Волога випаровується при температурі мокрого термометра.

2.3.17 Знайти середній потенціал сушіння в теоретичній сушарці за $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 0,7$ і $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 0,4$.

2.3.18 Знайти ККД теоретичної сушарки, якщо стан повітря змінюється від $\varphi_0 = 0,7$ та $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ до $\varphi_2 = 0,6$ та $t_2 = 50\text{ }^\circ\text{C}$. Волога випаровується при температурі мокрого термометра.

2.3.19 Знайти середній потенціал сушіння в теоретичні сушарці за $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_0 = 0,7$ і $t_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 0,4$.

2.3.20 Знайти кількість вологи, що випаровується при сушінні, якщо продуктивність сушарки за абсолютно сухим матеріалом 1200 кг/год. Початкова вологість матеріалу 75%, кінцева 10% (в перерахунку на абсолютно сухий матеріал).

3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОГОГО МАТЕРІАЛУ

3.1 Теоретичні відомості

Стан вологого матеріалу визначається його температурою і вологістю. Властивості вологих матеріалів характеризується такими теплофізичними характеристиками, як питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температуропровідності.

В теорії сушіння вологість матеріалу розраховується відносно маси абсолютно сухого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною.

Загальна маса вологого матеріалу (в кг)

$$q = q_{\text{вл}} + q_{\text{с.реч.}} \quad (3.1)$$

Вологість матеріалу відносно маси сухої речовини (в %)

$$W^c = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{с.реч.}}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Вологість матеріалу відносно загальної маси

$$W = \frac{q_{\text{вл}}}{q} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Формули переходу з однієї вологості в іншу

$$W^c = \frac{W}{100 + W} \cdot 100, \quad W = \frac{W^c}{100 \cdot W^c} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в *кг вологи/(кг сухої речовини)*, то отримаємо вологовміст (питомий масовміст) матеріалу

$$u = \frac{q_{\text{вл}}}{q_{\text{с.реч}}} \quad (3.5)$$

Якщо волога в матеріалі розподілена рівномірно, то

$$W^c = 100 \cdot u \quad \text{або} \quad u = W^c / 100. \quad (3.6)$$

Відповідно до початкової, критичної, рівноважної і кінцевої вологості $W^п$, $W^{кр}$, $W^р$, $W^к$ матеріалу розрізняють початковий $u_п$, критичний $u_{кр}$, рівноважний $u_р$ і кінцевий $u_к$ вологовміст (на суху речовину).

Якщо відомі ці вологовмісти, просто розрахувати тривалість кожного періоду сушіння:

– для I періоду (постійна швидкість сушіння)

$$\tau_1 = \frac{1}{k} (u_п - u_{кр}), \quad (3.7)$$

– для II періоду сушіння (змінна швидкість сушіння)

$$\tau_2 = \frac{u_{кр} - u_р}{k} \ln \frac{u_{кр} - u_р}{u_к - u_р}, \quad (3.8)$$

де k – коефіцієнт сушіння, який є кількістю кілограмів вологи, випаровуваної за 1 секунду, що припадає на 1 кілограм сухої речовини.

Загальна тривалість сушіння

$$\tau = \tau_1 + \tau_2, \quad (3.9)$$

Наближене рівняння для повної тривалості сушіння має вигляд

$$\tau = \frac{u_п - u_{кр}}{k} + \frac{u_{кр}}{k} \ln \frac{u_{кр}}{u_к}. \quad (3.10)$$

Коефіцієнт сушіння k визначають або експериментальним шляхом, або через коефіцієнт масовіддачі

$$k = \frac{W}{G_{сух} \cdot \tau} = \frac{F \cdot I \tau}{G_{сух} \cdot \tau} = \frac{F \cdot I}{G_{сух}} = \frac{F \cdot \beta_p \cdot (P_п - P_c)}{G_{сух}} = \frac{F \cdot \beta_p \cdot \Delta X}{G_{сух}}, \quad (3.11)$$

де F – площа випаровування вологи;

ΔX – потенціал сушіння.

3.2 Завдання для самостійної роботи

3.2.1 Який час необхідний для сушіння матеріалу від 37 до 7% вологості, якщо для висушування цього матеріалу з 32 до 9% відносної вологості промисловій сушарці необхідно 10 годин. Критичний вологовміст $u_{кр} = 0,16$ кг/кг, а рівноважний $u_p = 0,05$ кг/кг. Умови сушіння вважати однаковими в обох випадках. Пусковим періодом знехтувати.

3.2.2 Вологий матеріал з початковою вологою 33%, критичною 17% і рівноважною 2% висушується за постійних умов сушіння до 9% вологості протягом 8 годин. Визначити тривалість сушіння до 3% вологості в тих самих умовах. Вологість дана в відсотках від маси абсолютно сухого матеріалу.

3.2.3 Визначити коефіцієнт сушіння і час, необхідний для сушіння матеріалу від 40 до 8% вологості, якщо для висушування цього матеріалу з 32 до 9% відносної вологості промисловій сушарці необхідно 6 годин. Критичний вологовміст $u_{кр} = 0,12$ кг/кг, а рівноважний $u_p = 0,06$ кг/кг. Пусковим періодом знехтувати.

3.2.4 Тривалість першого періоду сушіння вологого матеріалу з вологістю 60% становить 6 годин. Визначити загальний час сушіння, якщо критична вологість матеріалу 20%, рівноважна 7%, кінцева 14%

3.2.5 За перший період сушіння, який становив 5 годин, вологовміст матеріалу знизився від $u_{п} = 0,72$ кг/кг до $u_{кр} = 0,18$ кг/кг. Якою має бути загальна тривалість сушіння, щоб висушити матеріал до $w_k = 6\%$. Рівноважна вологість матеріалу $w_p = 4\%$.

3.2.6 Визначити час, необхідний для сушіння матеріалу від 42 до 8% вологості, якщо для висушування цього матеріалу з 31 до 10% відносної вологості промисловій сушарці необхідно 6 годин. Критичний вологовміст $u_{кр} = 0,12$ кг/кг, а рівноважний $u_p = 0,06$ кг/кг. Визначити коефіцієнт сушіння. Пусковим періодом знехтувати.

3.2.7 Визначити загальний час сушіння, якщо критична вологість матеріалу 25%, рівноважна 7%, кінцева 14%. Тривалість першого періоду сушіння вологого матеріалу з вологістю 60% становить 8 годин.

3.2.8 Якою має бути загальна тривалість сушіння, щоб висушити матеріал до $w_k = 6\%$. Рівноважна вологість матеріалу $w_p = 4\%$. За перший період сушіння, який становив 7 годин, вологовміст матеріалу знизився від $u_{п} = 0,65$ кг/кг до $u_{кр} = 0,18$ кг/кг.

3.2.9 Визначити коефіцієнт сушіння і час, необхідний для сушіння матеріалу від 45 до 8% вологості, якщо для висушування цього матеріалу з 30

до 9% відносної вологості промисловій сушарці необхідно 6 годин. Критичний вологовміст $u_{кр} = 0,12$ кг/кг, а рівноважний $u_p = 0,06$ кг/кг. Пусковий період – 30 хвилин.

3.2.10 Пусковий період сушіння становить 1 годину. Тривалість першого періоду сушіння вологого матеріалу з вологістю 65% становить 6 годин. Визначити загальний час сушіння, якщо критична вологість матеріалу 20%, рівноважна 4%, кінцева 14%

3.2.11 Якою має бути загальна тривалість сушіння, щоб висушити матеріал до $w_k = 6\%$. За перший період сушіння, який становив 6 годин, вологовміст матеріалу знизився від $u_{п} = 0,52$ кг/кг до $u_{кр} = 0,15$ кг/кг. Рівноважна вологість матеріалу $w_p = 5\%$.

4 ПРОЦЕС В ТЕОРЕТИЧНІЙ СУШАРЦІ

4.1 Матеріальний баланс теоретичної сушарки

Запишемо рівняння матеріального балансу сушарки відповідно до позначень на рис. 4.1

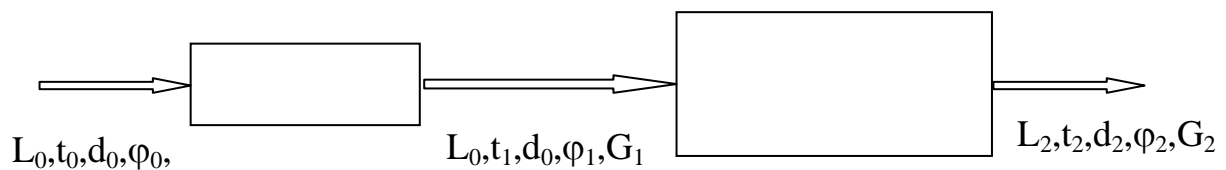


Рисунок 4.1 – Схема теоретичної сушарки

$$G_1 \frac{w_1}{100} + L_0 d_0 = G_2 \frac{w_2}{100} + L_2 d_2. \quad (4.1)$$

Вважаємо, що присмоктування і витікання повітря в сушильній системі відсутні, тобто $L_0 = L_1 = L_2 = L = \text{const}$.

Перепишемо останнє рівняння у вигляді

$$\frac{G_1 w_1 - G_2 w_2}{100} = L(d_2 - d_0). \quad (4.2)$$

Оскільки

$$\frac{G_1 w_1 - G_2 w_2}{100} = W, \quad (4.3)$$

рівняння (4.2) набуває вигляду

$$W = L(d_2 - d_0) . \quad (4.4)$$

Позначивши витрату повітря на 1 кг випарованої вологи L/W через ℓ , одержимо остаточний вираз для визначення витрати сухого повітря на 1 кг випаровуваної вологи

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_0} . \quad (4.5)$$

4.2 Тепловий баланс теоретичної сушарки

Визначимо витрату теплоти на 1 кг випаровуваної вологи. Якщо кожен кілограм сухого повітря нагрівається від t_0 до t_1 , причому ентальпія його при цьому збільшується від h_0 до h_1 , а для випаровування 1 кг вологи необхідно затратити ℓ м³ сухого повітря, то витрата теплоти на його нагрівання

$$q = \ell(h_1 - h_0) = \frac{h_1 - h_0}{d_2 - d_0} . \quad (4.6)$$

У цих формулах вологовміст повітря d , має розмірність: кг вологи/кг сухого повітря.

4.3 Розрахунок теоретичної сушарки за допомогою h - d діаграми

Теоретичною сушаркою називають уявну сушарку з попереднім підігрівом сушильного агента, в якій відсутні втрати теплоти в навколишнє середовище, на нагрів транспортних пристроїв і матеріалу, що сушиться, а температура матеріалу на вході і виході з сушильної камери дорівнює θ °C (рис. 4.2).

Тепловий баланс сушильної камери можна записати

$$L_0 h_0 + Q_k = L_1 h_1 = L_2 h_2, \quad (4.7)$$

де h_0 – ентальпія вологого повітря, що надходить в підігрівник;

h_1 – ентальпія вологого повітря після підігрівника на вході в сушарку;

h_2 – ентальпія вологого повітря за сушаркою;

Q_k – кількість теплоти, що надходить у повітря в підігрівнику.

Для $L_0 = L_1 = L_2 = \text{const}$ маємо рівність $h_1 = h_2 = \text{const}$, яка показує, що в теоретичній сушарці процес сушіння проходить за постійної ентальпії вологого повітря.

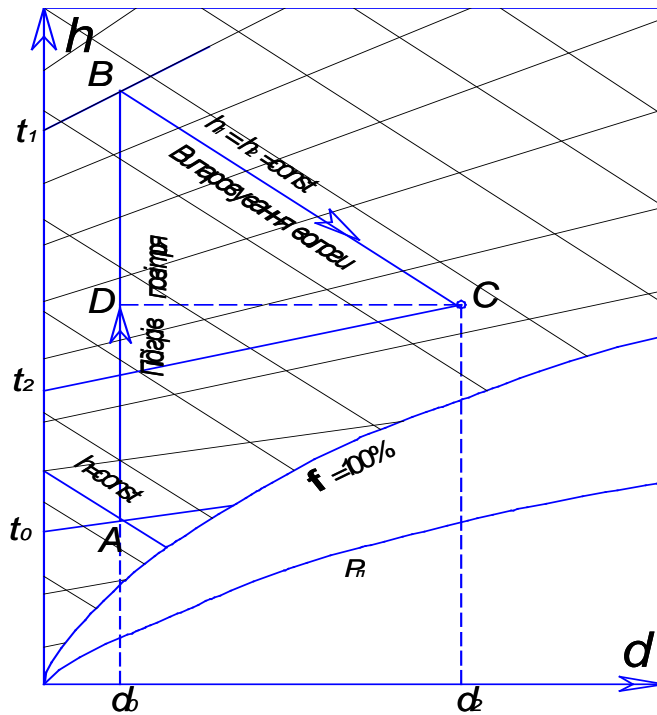


Рисунок 4.2 – Процес в теоретичній сушарці

Лінія АВ відповідає підігріву повітря в калорифері від температури t_0 до температури t_1 , процес сушіння – затрата теплоти на випаровування вологи і вологообмін між повітрям і матеріалом, що висушується, йде по лінії $h=const$ і зображається відрізком ВС.

Витрати повітря в теоретичній сушарці (кг/кг вологи)

$$\ell = \frac{1}{d_2 - d_0}. \quad (4.8)$$

Витрата теплоти в калорифері на 1 кг випаруваної вологи

$$q = \frac{h_1 - h_0}{d_2 - d_0}. \quad (4.9)$$

Витрата теплоти на підігрів повітря

$$q = \ell(h_1 - h_0) = \ell(h_2 - h_0). \quad (4.10)$$

Ентальпії повітря

$$h_2 = c_2 t_2 + d_2 h_{п2}, \quad h_0 = c_0 t_0 + d_0 h_{п0}. \quad (4.11)$$

де d_2 і d_0 – вологовмісти сушильного агента;

$h_{п2}$ і $h_{п0}$ – ентальпії водяної пари, що містяться в повітрі на вході в калорифер і виході з сушильної камери, відповідно.

Вважаємо, що теплоємність сухого повітря не залежить від температури

$$c_2 = c_0 = c_n. \quad (4.12)$$

Підставимо в (4.10), отримаємо

$$q = \ell(c_n t_2 + d_2 h_{п2}) - \ell(c_n t_0 + d_0 h_{п0}). \quad (4.13)$$

Додавши в праву частину $(\ell d_0 h_2 - \ell d_0 h_2)$ і пам'ятаючи, що $\ell = \frac{1}{d_2 - d_0}$,

отримаємо

$$q = \ell c_n (t_2 - t_0) + \ell d_0 (h_2 - h_0) + h_2. \quad (4.14)$$

Із (4.14) видно, що в теоретичній сушарці є такі види теплоти:

- $q_1 = h_2$ – витрата теплоти на випаровування вологи з матеріалу;
- $q_2 = \ell c_n (t_2 - t_0)$ – втрати теплоти сушильним агентом, що входить в сушарку з температурою t_0 і виходить з сушарки з температурою t_2 ;
- $q_3 = \ell d_0 (h_{п2} - h_{п0})$ – втрати теплоти внаслідок збільшення ентальпії транзитної вологи, яка міститься в повітрі на вході в сушарку.

4.4 Завдання для самостійної роботи

4.4.1 Визначити витрату повітря в теоретичній сушарці, якщо повітря з параметрами $t_0 = 20$ °C і $\varphi_0 = 68\%$ підігрівається в калорифері і відбирає з матеріалу 120 кг вологи, виходячи з сушарки з параметрами $t_2 = 48$ °C і $\varphi_2 = 50\%$. Визначити теплову потужність калорифера.

4.4.2 Визначити кількість вологи, яка випаровується з вологого матеріалу за одну годину при сушінні його повітрям з початковими параметрами $t_0 = 22$ °C і $d_0 = 0,008$ кг/кг, якщо його витрата становить 6000 м³/год. Параметри відпрацьованого повітря: $t_2 = 55$ °C і $\varphi_2 = 55\%$. Визначити також потужність калорифера.

4.4.3 Годинна витрата повітря в теоретичній сушарці становить 3600 м³/год, за теплової потужності калорифера 150 кВт. Визначити, яку кіль-

кість вологи відбере з матеріалу повітря з початковими параметрами $t_0 = 19$ °С, $\varphi_0 = 72\%$, якщо параметри відпрацьованого повітря становлять: $t_2 = 70$ °С і $\varphi_2 = 55\%$.

4.4.4 Визначити годинну витрату повітря з параметрами $t_0 = 20$ °С і $d_0 = 0,01$ кг/кг та теплову потужність калорифера, якщо в теоретичній сушарці випаровується 200 кг/год вологи. Вологовміст відпрацьованого повітря $d_2 = 0,06$ кг/кг, а його температура 60 °С.

4.4.5 Визначити параметри повітря після калорифера, витрату повітря і необхідну потужність калорифера, якщо тривалість сушіння 4 тонн вологого матеріалу з початковим вологовмістом $u_n = 0,6$ кг/кг становить 8 годин, а параметри вхідного і відпрацьованого повітря відповідно: $t_0 = 19$ °С, $\varphi_0 = 72\%$; $t_2 = 50$ °С і $\varphi_2 = 35\%$. Кінцевий вологовміст матеріалу $u_k = 0,065$ кг/кг.

4.4.6 Яким буде кінцевий вологовміст 2 тонн матеріалу з вологістю 70%, якщо за 5 годин сушіння в теоретичній сушарці повітрям з початковими параметрами $t_0 = 15$ °С, $\varphi_0 = 60\%$ використали теплоту $Q = 360$ МДж. Параметри вихідного повітря становлять $t_2 = 65$ °С і $\varphi_2 = 55\%$.

4.4.7 Вологий матеріал висушується в сушарці з калорифером потужністю 60 кВт, від вологості $w_n = 50\%$ до вологості $w_k = 14\%$. Визначити годинну витрату повітря, якщо $t_0 = 15$ °С, $\varphi_0 = 60\%$ і $t_2 = 50$ °С, $\varphi_2 = 35\%$, відповідно. Визначити годинну витрату вологого матеріалу. Пусковим періодом знехтувати.

4.4.8 Визначити витрату повітря і необхідну потужність калорифера, якщо тривалість сушіння 500 кг яблук з початковим вологовмістом $u_n = 0,6$ кг/кг становить 12 годин, а параметри вхідного і відпрацьованого повітря відповідно $t_0 = 19$ °С, $\varphi_0 = 72\%$; $t_2 = 50$ °С і $\varphi_2 = 35\%$. Кінцева вологість готового продукту $w_k = 14\%$.

4.4.9 Потужність калорифера в сушарці для сушіння чорносливу становить 50 кВт. Якою має бути тривалість сушіння 500 кг слив з початковою вологістю 80% до вологості 21%, якщо повітря на калорифер подається з параметрами $t_0 = 22$ °С, $\varphi_0 = 82\%$, а його витрата становить 30 кг/кг вологи?

4.4.10 Визначити, яку кількість вологи відбере з матеріалу повітря з початковими параметрами $t_0 = 19$ °С, $\varphi_0 = 72\%$, якщо сушарка працює на продув, а вихідні параметри повітря становлять: $t_2 = 70$ °С і $\varphi_2 = 55\%$. Годинна витрата повітря в теоретичній сушарці становить 3600 м³/год при тепловій потужності калорифера 200 кВт.

4.4.11 Визначити поверхню нагрівання вальцьової вакуум–сушарки видатністю 200 кг/год (за сухим матеріалом). Початкова вологість 50%, кінцева 5% (на загальну масу). Коефіцієнт тепловіддачі 348 Вт/(м²·К); температура сушіння 50 °С; теплоємність сухого матеріалу 1,26·10³ Дж/(кг·К); початкова температура матеріалу 20 °С; тиск грійної пари P_{абс} = 150 кПа. Втрата теплоти становить 10% від загальної кількості теплоти, яка віддається грійним паром.

4.4.12 В сушарці видатністю 1 т/год (за вологим матеріалом) висушується матеріал від 55 до 8% вологості (на загальну масу). Атмосферне повітря має параметри t₀ = 20 °С, φ₀ = 0,75 і нагрівається в калорифері до t₁ = 110 °С. Потенціал сушіння на виході із сушарки χ₂=10 °С. Знайти витрату повітря і грійної пари, якщо тиск пари P_{абс} = 250 кПа, а міра сухості 95%.

4.4.13 Видатність сушарки, що працює за нормальним сушильним варіантом 500 кг/год (за висушеним продуктом). В ній висушується матеріал від 42% до 9%. Температура повітря перед калорифером t₀ = 20 °С, а його точка роси t_R = 8 °С. Процес протікає за h = 125 кДж/кг. Температура повітря на виході з сушарки t₂ = 45 °С. Визначити витрату грійної пари і поверхню нагрівання калорифера, якщо тиск пари 200 кПа і вологість 5%, а коефіцієнт теплопередачі k = 31,5 Вт/(м²·К). Втрата теплоти в навколишнє середовище становить 50% від корисно витраченої.

5 ПРОЦЕС В ДІЙСНІЙ СУШАРЦІ

В дійсній сушарці мають місце додаткові втрати і підведення теплоти: нагрів повітря в проміжних калориферах, тепловиділення в хімічних реакціях, розморожування вологи, нагрів сушильного агента вентилятором.

5.1 Рівняння теплового балансу дійсної сушарки

Складові теплового балансу сушарок періодичної дії відносять до окремих періодів сушіння $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{період}} \right]$, а для сушарок неперервної дії – до однієї години роботи $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{год}} \right]$.

Складові теплового балансу дійсної сушарки подані в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Тепловий баланс дійсної сушарки для літнього часу

	Прихід	Витрата
Теплота, що надходить з повітрям	$L_0 h_0 + Q_{пв}$	$L_2 h_2$
Теплота, що надходить з матеріалом	$C_w W \theta_1 + G_2 C'_m \theta_2$	$G_2 C''_m \theta_2$
Теплота з транспортними пристроями	$G_{тр} C_{тр} \theta'_{тр}$	$G_{тр} C_{тр} \theta''_{тр}$
Нагрів в проміжних нагрівниках	$Q_{дод}$	—
Втрати в навколишнє середовище	—	Q_5

де $Q_{пв}$ – теплота, отримана повітрям перед сушаркою.

Для складання теплових балансів сушарок враховують тепловиділення від вентиляторів, яке додають залежно від схеми сушіння до $Q_{пв}$ або до $Q_{дод}$. Теплота на прогрів сушильних камер неперервної дії дорівнює нулю.

Складемо рівняння теплового балансу дійсної сушарки на підставі таблиці 5.1.

$$\begin{aligned} Q_{пв} + L_0 h_0 + C_w W \theta_1 + G_2 C'_m \theta_1 + G_{тр} C_{тр} \theta'_1 + Q_{дод} = \\ = L_2 h_2 + G_2 C''_m \theta_2 + G_{тр} C_{тр} \theta''_{тр} + Q_5 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Віднесемо витрату теплоти до 1кг випаровуваної вологи

$$\ell (h_1 - h_0) = q = \ell (h_2 - h_0) + q_m + q_{тр} + q_5 - q_{дод} - Q_1 C_w, \quad (5.2)$$

де $q = \ell \cdot (h_2 - h_0)$ – витрата теплоти в теоретичній сушарці;

$$q_m = \frac{G_2 C_2}{W} (\theta_2 - \theta_1) \text{ – витрата теплоти на нагрів матеріалу;}$$

$$q_{тр} = \frac{G_{тр} C_{тр}}{W} (\theta''_{тр} - \theta'_{тр}) \text{ – витрата теплоти на нагрів транспортних при-}$$

строїв;

$$q_5 = \frac{Q_5}{W} = \frac{\left(\sum_{i=1}^k F_i \right) \cdot k \cdot \Delta t}{W} \text{ – витрати теплоти в навколишнє середовище;}$$

$$q_{дод} = \frac{Q_{дод}}{W} \text{ – добавка теплоти від калориферів в сушарці;}$$

$Q_1 C_w$ – теплота, що надходить з навколишнім повітрям.

Отримаємо

$$\Delta = \ell (h_2 - h_1) = q_{дод} + Q_1 C_w - (q_m + q_{тр} + q_5), \quad (5.3)$$

Це рівняння являє собою внутрішній тепловий баланс сушарки, без врахування ролі повітря як теплоносія.

Коли працює дійсна сушарка можливі три випадки:

1) $\Delta = 0$, тоді

$$q_{\text{дод}} + Q_1 C_w = q_m + q_{\text{тр}} + q_5, \quad (5.4)$$

Втрати теплоти компенсуються кількістю додатково введеної теплоти, тут $\Delta = \ell (h_2 - h_1) = 0$. Оскільки $\ell \neq 0$ то $h_2 - h_1 = 0$, а $h_2 = h_1 = \text{const}$ – процес сушіння йде з постійною ентальпією, як в теоретичній сушарці;

2) $\Delta < 0$, тоді

$$q_{\text{дод}} + Q_1 C_w < q_m + q_{\text{тр}} + q_5, \quad (5.5)$$

тобто $\Delta = \ell (h_2 - h_1) < 0$ і, відповідно, $h_2 < h_1$;

3) $\Delta > 0$, тоді

$$q_{\text{дод}} + Q_1 C_w > q_m + q_{\text{тр}} + q_5, \quad (5.6)$$

тобто $\Delta = \ell (h_2 - h_1) > 0$ і, відповідно, $h_2 > h_1$.

У зимовий час витрата теплоти на нагрівання матеріалу збільшується, тому що частина вологи в матеріалі знаходиться в замерзломому стані. Експериментально встановлено, що в матеріалі замерзає тільки вільна волога, а зв'язана залишається в переохолодженій рідкій фазі. Наприклад, у вугіллі замерзає волога понад 22%, у фрезерному торфі – 33% і у дереві 28 – 30% від вологості на суху масу.

Розморозування потребує додаткової витрати теплоти на підігрівання льоду до 0°C і танення (перетворення його у воду) з тією ж температурою. Тому в таких випадках вказане вище значення $q_m = \frac{G_2 c_m}{W} (\theta_2 - \theta_1)$ варто збільшити на

$$q_{m1} = \frac{W'}{W} (334 + 2,1 \cdot \theta_1),$$

де $W' = \frac{[w_1^c - (w_1^c)']}{100 + w_1^c}$ – кількість вологи, що замерзла, а $(w_1^c)'$ – вологість

матеріалу, нижче якої волога не замерзає і вище якої вся волога (вода) знаходиться в стані льоду.

Для визначення витрати теплоти на сушіння необхідно враховувати також втрати теплоти внаслідок газопроникності стін і нещільності огоро-

джень. Ці втрати називають неорганізованим повітрообміном і їх розрахувати неможливо. У камерних лісосушарках, де сушіння відбувається за високої вологості сушильного агента, вони можуть доходити до 20 – 30% від загальної витрати теплоти на сушіння.

5.2 Побудова дійсного процесу сушіння в h-d діаграмі

Принцип побудови дійсного процесу подано на рис. 5.1.

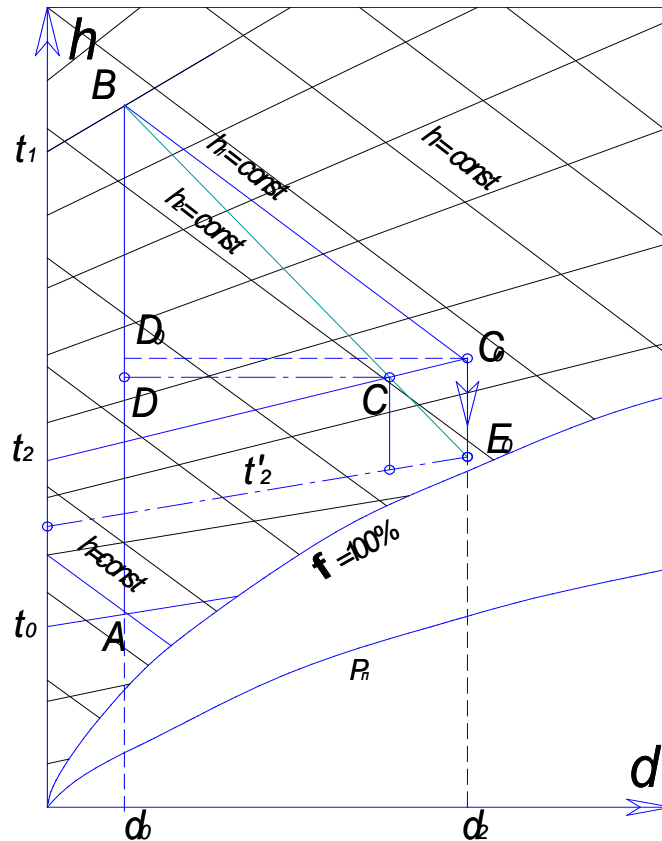


Рисунок 5.1 – Побудова дійсного процесу сушіння в h-d діаграмі

Побудова дійсного процесу сушіння в h-d діаграмі за наявності теплових втрат $\Delta < 0$ (тобто, коли $h_2 = h_1 - \frac{\Delta}{\ell}$) починається з побудови теоретичного процесу. Потім на лінії $h_1 = \text{const}$ теоретичного процесу вибирається довільна точка C_0 і від неї вниз відкладається відрізок

$$C_0E_0 = \frac{\Delta C_0 D_0}{1000} \cdot \frac{M_d}{M_h}, \quad (5.7)$$

де M_d і M_h – масштаби ентальпій і вологовмістів для цієї h-d діаграми.

Величина Δ визначається за формулою (5.3). З точки B проводиться політропа BE_0 дійсного процесу. На цій лінії знаходиться кінцева точка C, тобто точка дійсного процесу, що визначається перетином політропи з лініями

постійної вологості або температури, які відповідають стану повітря, що виходить з сушарки.

При побудові в $h-d$ діаграмі дійсного процесу сушіння з додатковими виділеннями теплоти, ($\Delta > 0$), політропа процесу розташована вище лінії $h = \text{const}$ теоретичного процесу. Відмінність в побудові цього процесу від побудови при $\Delta < 0$ полягає тільки в тому, що величину C_0E_0 потрібно відкласти від точки C_0 вгору, а не вниз.

5.3 Завдання для самостійної роботи

5.3.1 Протитокова сушарка працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 500 кг/год. Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 45% і 16%, а його температура на вході і виході відповідно: $\theta_1 = 18^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 47^\circ\text{C}$, стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 15^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 50^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50\%$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,14$ кг/кг становить 2,5 кДж/(кг·К). Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо втрати в навколишнє середовище становлять 21%.

5.3.2 Початкова і кінцева вологість матеріалу, що сушиться в протитоковій сушарці, яка працює за нормальним режимом відповідно 55% і 14%, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 15^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 52^\circ\text{C}$, стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 15^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 55^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,08$ кг/кг становить 1,85 кДж/(кг·К). Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо витрата вологого матеріалу 900 кг/год, а втрати в навколишнє середовище становлять 11%.

5.3.3 Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо вона працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 1500 кг/год. Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 50% і 18%, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 18^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 45^\circ\text{C}$, стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 18^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 72\%$; $t_2 = 53^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50\%$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,14$ кг/кг становить 2,5 кДж/(кг·К), втрати в навколишнє середовище становлять 21%. Рух матеріалу і повітря протитоковий.

5.3.4 Стрічкова сушарка працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 700 кг/год. Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 75% і 14%, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 50^\circ\text{C}$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,18$ кг/кг становить 2,55 кДж/(кг·К). Скласти тепловий баланс сушарки, якщо втрати в навколишнє середовище становлять 8%. Стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 15^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 50^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50\%$.

5.3.5 Протитокова тунельна сушарка працює за нормальним режимом, з витратою вологого матеріалу 2500 кг/год. Початкова і кінцева вологість

матеріалу відповідно 45% і 24%. Стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50\%$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,18 \text{ кг/кг}$ становить $2,7 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо втрати в навколишнє середовище становлять 13%, а температура повітря на вході і виході відповідно $\theta_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 57 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.3.6 Початкова і кінцева вологість матеріалу, що сушиться в дійсній сушарці, яка працює за режимом з частковою рециркуляцією теплоносія, відповідно 55% і 14%, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 52 \text{ }^\circ\text{C}$, стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 40\%$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,08$ становить $1,85 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо витрата вологого матеріалу 900 кг/год , а втрати в навколишнє середовище становлять 11%. Коефіцієнт рециркуляції 1,8.

5.3.7 Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо вона працює за замкненим циклом, з витратою вологого матеріалу 2500 кг/год . Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 50% і 18%, а його температура на вході і виході відповідно $\theta_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$, характеристики повітря навколишнього середовища до і після сушіння: $t_0 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 72\%$; $t_2 = 53 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50\%$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,14 \text{ кг/кг}$ становить $2,5 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, втрати в навколишнє середовище становлять 21%. Рух матеріалу і повітря – протитоковий.

5.3.8 Барабанна сушарка працює за нормальним режимом з витратою вологого матеріалу 2500 кг/год . Початкова і кінцева вологість матеріалу відповідно 9% і 5%. Стан повітря до калорифера і після сушіння: $t_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 70\%$; $t_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50\%$. Теплоємність матеріалу за $u_k = 0,1$ становить $2,7 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. Скласти тепловий баланс дійсної сушарки, якщо втрати в навколишнє середовище становлять 13%, а температура повітря на вході і виході відповідно $\theta_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\theta_2 = 57 \text{ }^\circ\text{C}$.

6 ІНТЕНСИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРОВУВАННЯ

6.1 Теоретичні відомості

Інтенсивність випаровування вологи з вільної поверхні при стаціонарному режимі можна визначити за формулою Дальтона

$$I = \frac{W}{F\tau} = \beta_p (P_{\text{II}} - P_{\text{C}}), \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (6.1)$$

де W – кількість рідини, яка випарувалася, кг;

F – поверхня випаровування, m^2 ;

β_p – коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці парціальних тисків, $\frac{кг\ вологи}{m^2 \cdot c \cdot Па}$;

P_{II} , P_C – парціальні тиски водяної пари над поверхнею і в середовищі, Па,

τ – час, с.

Для наближених розрахунків можна користуватися формулою

$$I = 5,7 \omega^{0,8} (P_{II} - P_C), \quad (6.2)$$

де ω – швидкість повітря, м/с.

Між кількістю рідини, що випарувалась, і витраченою теплотою є залежність:

$$q = I \cdot r = \alpha(t_{II} - t_c), \quad (6.3)$$

де r – питома теплота випаровування, $\frac{Дж}{кг}$;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/(m^2 \cdot K)$;

t_c і t_{II} – температури навколишнього середовища і поверхні випаровування.

Для адіабатного випаровування температура навколишнього середовища дорівнює температурі сухого термометра, а температура поверхні – температурі мокрого, тому

$$I = \frac{W}{F\tau} = \frac{\alpha}{r}(t_c - t_m). \quad (6.4)$$

Коефіцієнт масовіддачі β_p визначається з критеріального рівняння

$$Sh = A \cdot Re^n \cdot Sc^{0,33} \cdot Gu^{0,135}, \quad (6.5)$$

де $Sh = \frac{\beta \cdot l^*}{D}$ – масообмінний критерій Нуссельта (критерій Шервуда);

$Re = \frac{\omega \cdot l^*}{\nu}$ – критерій Рейнольдса;

$Sc = \frac{\nu}{D}$ – масообмінний критерій Прандтля (критерій Шмідта);

$$Gu = \frac{T_c - T_m}{T_c} - \text{критерій Гухмана};$$

D – коефіцієнт дифузії.

Визначальним розміром при обчисленні Sh і Re є довжина поверхні випаровування ℓ за напрямком руху сушильного агента.

Величини A і n в рівнянні залежать від критерію Рейнольдса (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Значення коефіцієнтів A і n від критерію Рейнольдса

Re	A	n
1–200	0,9	0,5
200–6000	0,87	0,54
6000–70000	0,347	0,65

$$D_c = D_0 \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right) = 2,2 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right), \quad (6.6)$$

де P – тиск суміші для цієї температури, Па;

P_0 – барометричний тиск, Па.

Розрізняють коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці концентрацій, β_c (м/с) і коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці парціальних

тисків $\beta_p \left(\frac{\text{кг вологи}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}}\right)$.

Зв'язок між ними

$$\beta_p = \frac{\beta}{RT}, \quad (6.7)$$

де $R = \frac{8314}{\mu} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right)$ – газова стала водяної пари;

T – температура, К.

6.2 Задачі для самостійної роботи

6.2.1 Визначити кількість вологи, що випаровується за 10 годин з 1 м^2 стрічки сушарки шириною $0,8 \text{ м}$, якщо швидкість повітря над сировиною 5 м/с , а його температура $60 \text{ }^\circ\text{C}$ і відносна вологість $\varphi = 18\%$. Тиск суміші

100 кПа. Температура сировини 45 °С. Перепад парціальних тисків водяної пари над сировиною і в повітрі $\Delta P = 0,7$ кПа.

6.2.2 Швидкість повітря над сировиною в стрічковій сушарці 4 м/с, а його температура 65 °С при відносній вологості $\phi = 14\%$. Тиск суміші 100 кПа. Температура сировини 45 °С. Визначити кількість вологи, що випаровується за 10 годин з 1 м² стрічки сушарки шириною 0,5 м.

6.2.3 Волога випаровується з 1 м² стрічки сушарки шириною 0,1 м, якщо швидкість повітря над сировиною 0,9 м/с, а його температура 60 °С. Тиск суміші 100 кПа. Температура сировини 45 °С. Перепад парціальних тисків водяної пари над сировиною і в повітрі $\Delta P = 0,7$ кПа. Коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря $\nu = 1,897 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Визначити кількість вологи, випаровуваної за 20 годин.

6.2.4 Швидкість повітря над сировиною в тунельній сушарці, в якій сушаться сливи, 4 м/с, а його температура 55 °С при відносній вологості $\phi = 20\%$. Тиск суміші 98 кПа. Температура сировини 45 °С. Перепад парціальних тисків водяної пари над сировиною і в повітрі $\Delta P = 0,65$ кПа. Визначити кількість вологи, що випаровується за 40 годин з 1 піддона вагонетки сушарки розмірами 1 м × 0,5 м.

6.2.5 В тунельній сушарці сушаться сливи. Швидкість повітря над сировиною, 3 м/с, а його температура 60 °С. Тиск суміші 98 кПа. Температура сировини 45 °С. Перепад парціальних тисків водяної пари над сировиною і в повітрі $\Delta P = 0,75$ кПа. Коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu = 1,897 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Визначити кількість вологи, що випаровується за 40 годин з 1 вагонетки сушарки, яка містить 15 піддонів розмірами 1 м × 0,5 м.

6.2.6 В стрічковій сушарці сушаться порізані яблука при температурі 50 °С. Швидкість повітря над сировиною 0,8 м/с, а його температура 65 °С за відносної вологості $\phi = 20\%$. Тиск суміші 100 кПа. Визначити кількість вологи, що випаровується за 12 годин з 1 стрічки сушарки розмірами 5 м × 0,5 м.

6.2.7 Яка кількість вологи, випаровується за 5 годин з 1 піддона камерної сушарки розмірами 1 м × 0,5 м? Температура сировини 50 °С. Швидкість повітря над сировиною 0,6 м/с, а його температура 55 °С. Тиск суміші 101 кПа. Парціальний тиск водяної пари над сировиною $P_c = 1,75$ кПа. Парціальний тиск водяної пари в повітрі $P_n = 0,75$ кПа.

6.2.8 Визначити необхідну прохідну потужність конденсатовідвідника, якщо площа піддонів в камерній сушарці 25 м². Температура сировини 47 °С. Швидкість повітря над сировиною 3 м/с, а його температура 55 °С за

відносної вологості $\varphi = 16\%$. Тиск суміші 101 кПа. Ширина піддона 1 метр.

6.2.9 Площа піддонів в камерній сушарці 25 м². Температура сировини 42 °С. Швидкість повітря над сировиною 8 м/с, а його температура 55 °С за відносної вологості $\varphi = 12\%$. Тиск суміші 103 кПа. Визначити необхідну прохідну потужність конденсатовідвідника.

ДОДАТКИ

Додаток А

Діаграми вологого повітря

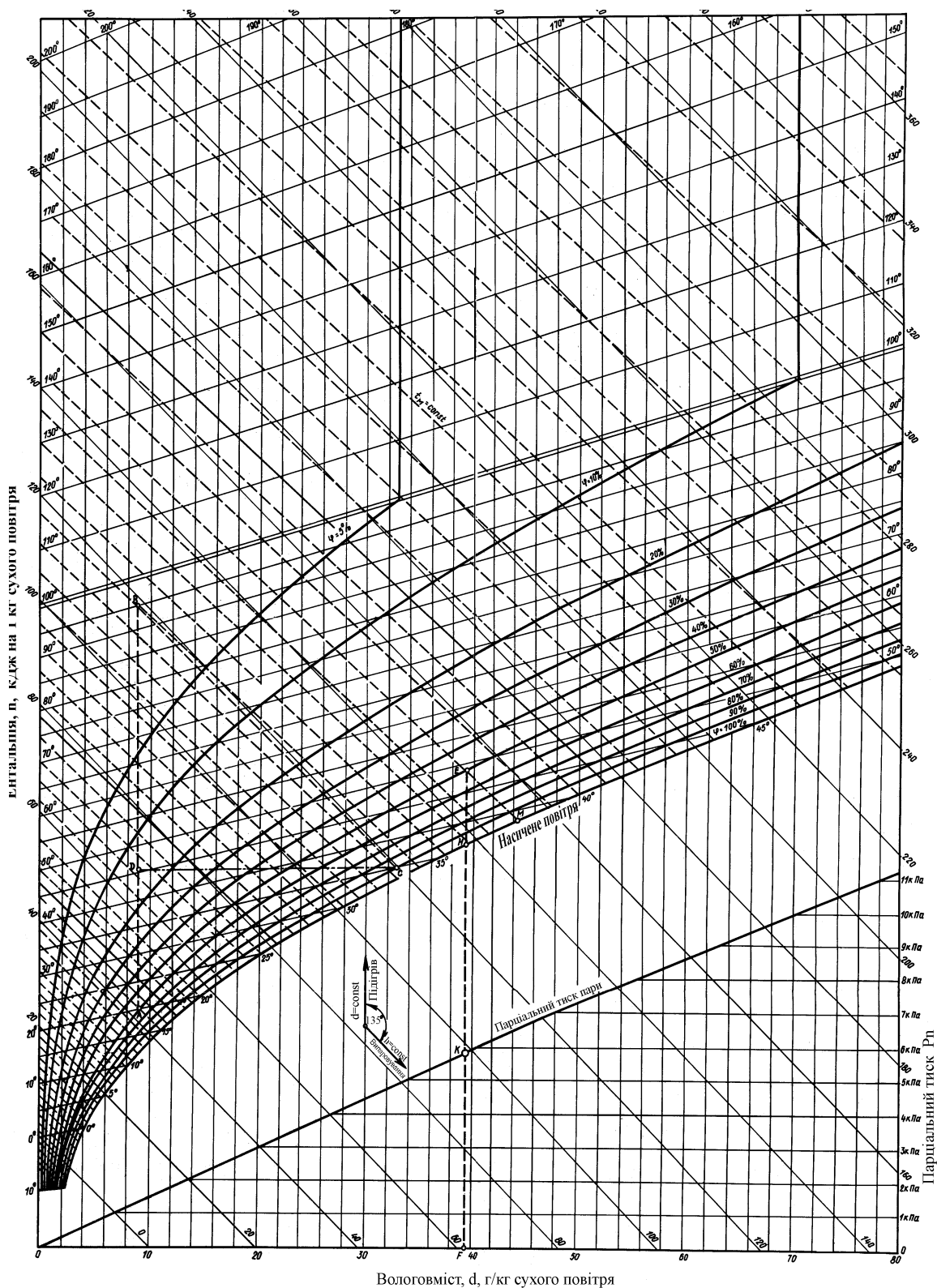
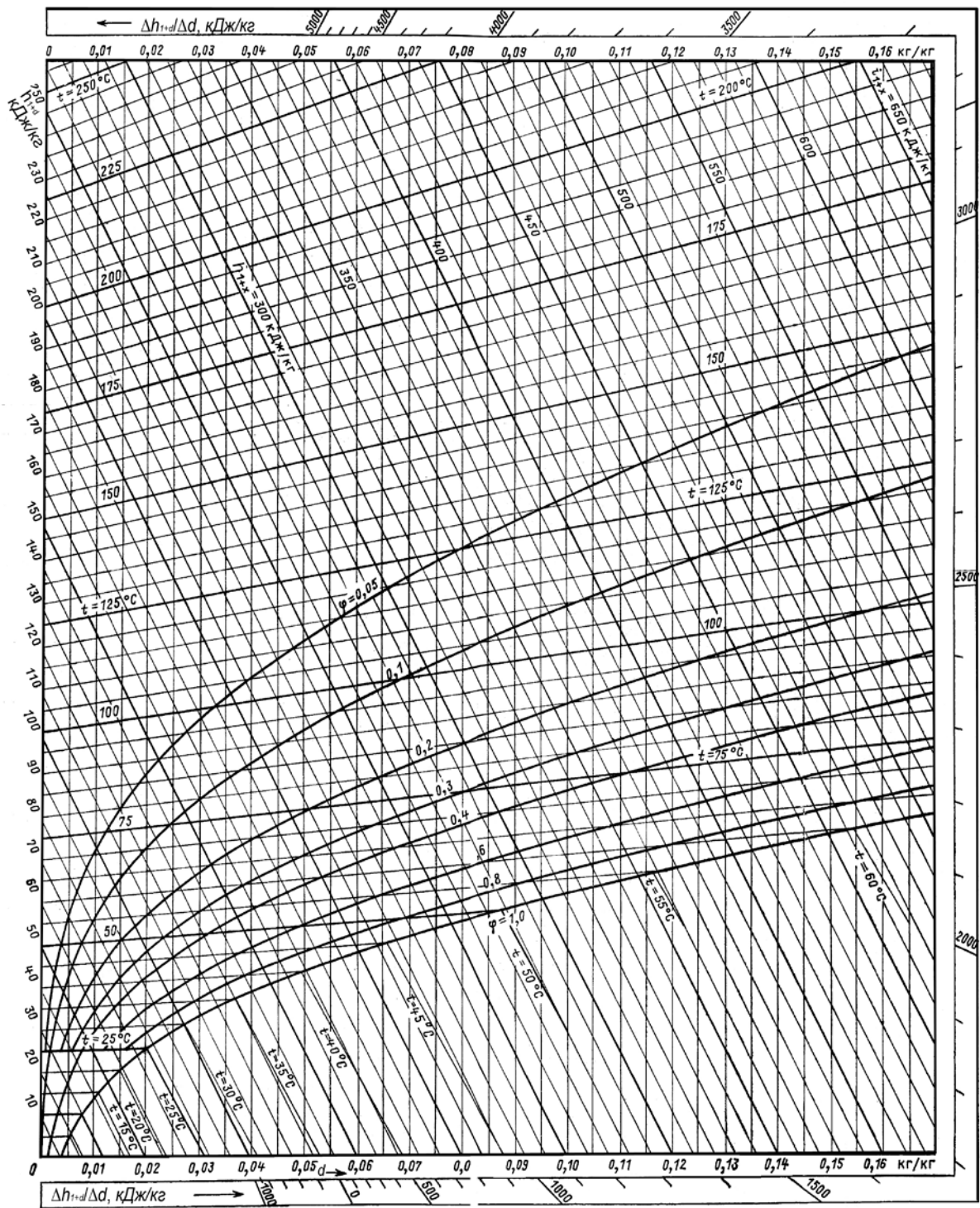


Рисунок А.1 – H-d діаграма вологого повітря для малих вологовмістів



h - d діаграма вологого повітря для великих вологовмістів

Рисунок А.2 – *h-d* діаграма вологого повітря

Додаток Б
Теплофізичні властивості води на лінії насичення

Таблиця Б.1 – Теплофізичні властивості води на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{бар}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{град)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{град)}$	$\alpha \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, 1/\text{град}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{кГ/м}$	Pr
0	1,01	999,9	4,212	0,551	1,31	1,789	-0,63	77,1	13,67
10	1,01	999,7	4,191	0,574	1,37	1,306	+0,7	75,6	9,52
20	1,01	998,2	4,183	0,599	1,43	1,0006	1,82	74,1	7,02
40	1,01	992,2	4,174	0,634	1,53	0,659	3,87	71,0	4,31
60	1,01	983,2	4,178	0,659	1,60	0,478	5,11	67,5	2,98
80	1,01	971,8	4,195	0,674	1,66	0,365	6,32	63,8	2,21
100	1,01	958,4	4,220	0,683	1,69	0,295	7,52	60,0	1,75
120	1,99	943,1	4,25	0,686	1,71	0,252	8,64	55,9	1,47
140	3,62	926,1	4,287	0,685	1,72	0,217	9,72	51,7	1,26
160	6,18	907,4	4,346	0,683	1,73	0,191	10,7	47,5	1,10
180	10,03	886,9	4,417	0,674	1,72	0,173	11,9	43,1	1,00
200	15,55	863,0	4,505	0,663	1,70	0,158	13,3	38,4	0,93
220	23,20	840,3	4,614	0,646	1,66	0,148	14,8	33,8	0,89
240	33,48	813,6	4,756	0,628	1,62	0,141	16,8	29,1	0,87
260	46,59	784,0	4,949	0,605	1,56	0,135	19,7	24,2	0,87
280	64,20	750,7	5,229	0,574	1,46	0,131	23,7	19,5	0,90
300	85,92	712,5	5,736	0,540	1,32	0,128	29,2	14,7	0,97
320	112,90	667,1	6,573	0,506	1,15	0,128	38,2	10,0	1,11
340	146,08	610,1	8,164	0,457	0,92	0,127	53,4	5,78	1,39
360	186,81	528,0	13,98	0,396	0,54	0,126	109,0	2,06	2,35
370	210,54	450,5	40,42	0,337	0,18	0,126	264,0	0,48	6,79

Додаток В
Теплофізичні властивості водяної пари на лінії насичення

Таблиця В.1 – Теплофізичні властивості водяної пари на лінії насичення

$t, ^\circ\text{C}$	$P \cdot 10^5$ бар	ρ'' , ³ кг/м ³	i'' , кДж/кг	r , кДж/кг	C_p кДж/(кг·град)	$\lambda \cdot 10^2$ Вт/ (м·град)	$a \cdot 10^6$ м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	11,46	1,09
130	2,7	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,4	2,395	2,884	4,728	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	2,93	1,25
190	12,55	6,394	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,1	16,24	10,70	0,0580	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	10,79	0,0386	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	0,166	11,1

Додаток Д
Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску

Таблиця Д.1 – Теплофізичні властивості сухого повітря за умови нормального атмосферного тиску

t, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/кг·К	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/м·К	$a \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Н·с/м ²	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,548	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,803	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	44,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Додаток Е
Термодинамічні властивості вологого повітря

Таблиця Е.1 – Термодинамічні властивості вологого повітря

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{п}}, \text{Па}$	$d'', \text{г/кг}$	$c_{p, c'}$ кДж/(кг·К)	$c_{p, c}$ кДж/(кг·К)	$i_c, \text{кДж/кг}$	$i''_{\text{п}}, \text{кДж/кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$\rho_c, \text{кг/м}^3$
-25	62,795	0,3908	1,006	1,0067	-25,15	0,9591	-24,19	1,405
-24	69,461	0,4324	1,006	1,0068	-24,14	1,062	-23,08	1,399
-23	76,794	0,4780	1,006	1,0069	-23,14	1,175	-21,96	1,394
-22	84,793	0,5279	1,006	1,0069	-22,13	1,298	-20,83	1,388
-21	93,459	0,5818	1,006	1,0071	-21,13	1,432	-19,69	1,383
-20	102,925	0,6408	1,006	1,0072	-20,12	1,579	-18,54	1,377
-19	113,324	0,7057	1,006	1,0073	-19,11	1,740	-17,37	1,372
-18	124,656	0,7763	1,006	1,0075	-18,11	1,915	-16,19	1,366
-17	136,922	0,8528	1,006	1,0076	-17,10	2,106	-15,00	1,361
-16	150,387	0,9368	1,006	1,0078	-16,10	2,315	-13,78	1,356
-15	165,053	1,028	1,006	1,0079	-15,09	2,542	-12,55	1,351
-14	180,918	1,127	1,006	1,0081	-14,08	2,789	-11,30	1,345
-13	198,117	1,235	1,006	1,0083	-13,08	3,059	-10,02	1,340
-12	216,915	1,352	1,006	1,0085	-12,07	3,351	-8,72	1,335
-11	237,313	1,480	1,006	1,0088	-11,07	3,671	-7,40	1,330
-10	259,445	1,618	1,006	1,0090	-10,06	4,016	-6,04	1,325
-9	283,309	1,767	1,006	1,0093	-9,05	4,390	-4,66	1,320
-8	309,440	1,931	1,006	1,0096	-8,05	4,800	-3,25	1,315
-7	337,571	2,107	1,006	1,0099	-7,04	5,242	-1,80	1,310
-6	368,102	2,298	1,006	1,0103	-6,04	5,722	-0,31	1,305
-5	401,033	2,504	1,006	1,0107	-5,03	6,239	1,21	1,300
-4	436,763	2,729	1,006	1,0111	-4,02	6,805	2,78	1,295
-3	475,426	2,971	1,006	1,0116	-3,02	7,414	4,40	1,290
-2	517,156	3,233	1,006	1,0120	-2,01	8,074	6,06	1,286
-1	562,086	3,516	1,006	1,0126	-1,01	8,787	7,78	1,281
0	610,8	3,823	1,006	1,0131	0	9,561	9,56	1,276
1	656,6	4,111	1,006	1,0127	1,01	10,289	11,30	1,272
2	705,4	4,419	1,006	1,0143	2,01	11,068	13,08	1,267
3	757,5	4,748	1,006	1,0149	3,02	11,901	14,92	1,262
4	812,9	5,098	1,006	1,0155	4,02	12,788	16,81	1,258
5	871,8	5,470	1,006	1,0162	5,03	13,732	18,76	1,253
6	934,6	5,868	1,006	1,0170	6,04	14,742	20,78	1,249
7	1001,2	6,290	1,006	1,0178	7,04	15,814	22,86	1,244
8	1072,1	6,741	1,006	1,0186	8,05	16,960	25,01	1,240
9	1147,3	7,219	1,006	1,0195	9,05	18,176	27,23	1,236
10	1227,1	7,727	1,006	1,0205	10,06	19,470	29,53	1,231

Продовження таблиці Е.1

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{п}}, \text{Па}$	$d'' , \text{г/кг}$	$c_{\text{p}, c'} \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$c_{\text{p}, c} \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$i_{\text{с}}, \text{кДж/кг}$	$i''_{\text{п}}, \text{кДж/кг}$	$i'_{\text{п}}, \text{кДж/кг}$	$\rho_{\text{с}}, \text{кг/м}^3$
11	1311,8	8,268	1,006	1,0215	11,07	20,848	31,93	1,227
12	1401,5	8,841	1,006	1,0225	12,07	22,310	34,38	1,223
13	1496,7	9,451	1,006	1,0237	13,08	23,867	36,95	1,218
14	1597,4	10,097	1,006	1,0249	14,08	25,517	39,60	1,214
15	1704,1	10,783	1,006	1,0268	15,09	27,271	42,36	1,210
16	1817,0	11,511	1,006	1,0275	16,10	29,133	45,23	1,206
17	1936,4	12,282	1,006	1,0290	17,10	31,108	48,21	1,201
18	2062,6	13,100	1,006	1,0305	18,11	33,204	51,31	1,197
19	2196,0	13,966	1,006	1,0322	19,11	35,425	54,54	1,193
20	2336,8	14,883	1,006	1,0339	20,12	37,779	57,90	1,189
21	2485,5	15,854	1,006	1,0357	21,13	40,273	61,40	1,185
22	2642,4	16,882	1,0061	1,0379	22,13	42,916	65,05	1,181
23	2807,9	17,970	1,0061	1,0398	23,14	45,716	68,86	1,177
24	2982,4	19,121	1,0061	1,0416	24,15	48,680	72,83	1,173
25	3166,3	20,338	1,0061	1,0435	25,15	51,816	76,97	1,169
26	3360,0	21,626	1,0061	1,0472	26,16	55,138	81,30	1,165
27	3563,9	22,987	1,0061	1,0491	27,16	58,651	85,82	1,161
28	3778,5	24,425	1,0061	1,0510	28,17	62,366	90,54	1,158
29	4004,3	25,946	1,0062	1,0548	29,18	66,298	95,48	1,154
30	4241,7	27,552	1,0062	1,0586	30,19	70,453	100,64	1,150
31	4491,3	29,250	1,0062	1,0604	31,19	74,850	106,04	1,146
32	4753,6	31,043	1,0062	1,0642	32,20	79,496	111,69	1,142
33	5029,0	32,937	1,0063	1,0680	33,21	84,408	117,61	1,139
34	5318,2	34,927	1,0063	1,0718	34,21	89,599	123,81	1,135
35	5621,7	37,050	1,0063	1,0755	35,22	95,087	130,31	1,131
36	5940,1	39,281	1,0063	1,0792	36,23	100,886	137,11	1,128
37	6274,0	41,637	1,0064	1,0849	37,24	107,015	144,25	1,124
38	6624,0	44,124	1,0064	1,0883	38,24	113,49	151,73	1,120
39	6990,7	46,750	1,0064	1,0937	39,25	120,33	159,58	1,117

Додаток Ж
Теплофізичні властивості димових газів

Таблиця Ж.1 – Теплофізичні властивості димових газів
($B=760$ мм рт.ст. $\approx 0,01 \cdot 10^5$ Па; $\bar{p}(\text{CO}_2) = 0,13$; $\bar{p}(\text{H}_2\text{O}) = 0,11$; $\bar{p}(\text{N}_2) = 0,76$)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,310	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Додаток И
Максимальна припустима швидкість газу на виході з сушарки

Таблиця И.1 – Максимальна припустима швидкість газу на виході з сушарки

Уявна густина матеріалу, кг/ м^3	Швидкість газу м/с при еквівалентному діаметрі частинок, мм		
	0,3	0,3...2	2
600	0,5	0,5–0,75	1–2
1500	1,75	1,75–3,5	3–5
2000	3	3–7,5	8
2500	4	4–10	10
2500	5	5–12	13

*Електронне навчальне видання
комбінованого використання.
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Методичні вказівки
до виконання самостійної роботи студентів з дисципліни
«Сушильні процеси та установки»**

Укладач : **Співак Олександр Юрійович**

Рукопис оформив О. Співак

Редактор О. Ткачук

Оригінал-макет виготовив О. Ткачук

Підписано до видання 19.06.2020 р.
Гарнітура Times New Roman. Зам. № P2020-08.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

Тел. (0432) 65-18-06.

press.vntu.edu.ua;

Email: irvc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.