



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”



ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СУШАРКИ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ЧАСТИНИ СПРАЦЬОВАНОГО ПОВІТРЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ НДРС З КУРСУ «ПРОЦЕСИ
ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ І НАФТОПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ»

Київ НТУУ «КПІ» 2008

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СУШАРКИ З
РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ЧАСТИНИ СПРАЦЬОВАНОГО
ПОВІТРЯ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ НДРС З КУРСУ «ПРОЦЕСИ
ТА АПАРАТИ ХІМІЧНИХ І НАФТОПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ»

Для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів
всіх форм навчання

Затверджено
на засіданні кафедри
машин і апаратів
хімічних та нафтопереробних
виробництв
Протокол № 4 від 15.10.08 р.

Київ НТУУ «КПІ» 2008

Дослідження роботи сушарки з рециркуляцією частини спрацьованого повітря: Метод. вказівки до проведення НДРС з курсу „Процеси та апарати хімічних і нафтопереробних виробництв” для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів всіх форм навчання / Укл. І.А.Андреєв – К.: КПІ, 2008. – 18 с.

Укладач

І.А.Андреєв, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний редактор
професор

Я.М.Корнієнко, доктор техн. наук,

Рецензент

Л.І.Ружинська, канд. техн. наук, професор

1. ВСТУП І ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Часто при проведенні технологічних процесів доводиться видаляти з матеріалів, що обробляються, вологу. Процес видалення вологи з вологих матеріалів шляхом випаровування при підведенні теплоти, називається сушінням. Найбільш поширене конвективне сушіння, за якого теплота, необхідна для випарування вологи, піводиться до матеріалу, що висушується з допомогою проміжного робочого тіла – сушильного агенту. Для інтенсифікації процесу використовують штучну циркуляцію сушильного агенту.

Сушіння із замкненою рециркуляцією сушильного агенту застосовується тоді, коли використовується чистий і дорогий газ – висушувальний.

У пропонованих вказівках описано рециркуляційну сушарку з частковим підживленням свіжого і викидом відпрцьованого сушильного агенту, що дозволяє здійснювати сушіння матеріалів, які не допускають жорстких умов, вести процес за малої різниці температур сушильного агенту при вході і виході із сушильної камери, використовувати підвищені швидкості походження висушувальним газом сушильної камери, плавно регулювати вологість сушильного агенту.

Мета даного дослідження – вивчити роботу рециркуляційної сушарки і здійснити графоаналітичний розрахунок процесу за допомогою І – х діаграми стану вологого повітря.

2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Фізична суть процесу конвективного сушіння зводиться до видалання вологи з матеріалу шляхом випаровування, рушійною силою якою є різниця парціальних тисків парів над матеріалом p_m і в потоці сушильного агента /повітря/ p_n . Сушіння розпочинається, коли $p_m > p_n$. Процес сушіння припиняється і настає стан рівноваги при рівності парціальних тисків / $p_m = p_n$ /. Необхідна умова процесу – підведення теплоти.

При підведенні теплоти з допомогою сушильного агента спочатку віддаляється поверхнева волога матеріалу /І період сушіння/. Швидкість випаровування вільної вологи в цьому періоді постійна. Процес аналогічний випарюванню з вільної поверхні рідини і підпорядковується законові Дальтона:

$$q_m = \frac{dW}{F d\tau} = K_p (p_m - p_n),$$

де q_m - кількість вологи, що виділяється з 1 м^2 поверхні в одиницю часу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; dW - кількість видаленої вологи, кг ; $d\tau$ - час випаровування, с ; F - поверхня випаровування, м^2 ; K_p - коефіцієнт масовіддачі, $\text{кг}/(\text{Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$.

У II періоді сушіння порушується рівновага вологи у матеріалі. Виникає градієнт вологовмісту ∇C за товщиною висушуваного матеріалу і волога прямує з внутрішніх шарів матеріалу до зовнішніх. При цьому поверхневі мають вищу температуру. Тепловий потік спрямований всередину матеріалу. За рахунок градієнта температур ∇t визивається термодифузія, процес сушіння дещо гальмується, волога переміщається в напрямку теплового потоку, тобто всередину матеріалу. Рушійні сили переміщення вологи спрямовані у протилежні боки. За невеликих значень

∇t негативний вплив термовологопровідності виявляється мало. II період характеризується падінням швидкості сушіння. Сумарна густина потоку вологи всередині матеріалу, $кг(вологи)/(м^2 \cdot с)$:

$$q_m = q_{mc} - q_{mt}.$$

Густина потоків вологи за рахунок дифузії q_{mc} та термодифузії q_{mt} визначається за формулами, $кг(вологи)/(м^2 \cdot с)$:

$$q_{mc} = -a_m \rho_0 \nabla c;$$

$$q_{mt} = -a_m \rho_0 \delta \nabla t,$$

де a_m - коефіцієнт потенціалопровідності, $м^2 / с$;

ρ_0 - густина сухого матеріалу, $кг / м^3$;

C - вологовміст матеріалу, $кг(вологи)/кг(сухого матеріалу)$;

δ - термоградієнтний коефіцієнт, $^{\circ}C$; t - температура матеріалу, $^{\circ}C$;

$$\nabla C = \frac{\partial C}{\partial x} i + \frac{\partial C}{\partial y} j + \frac{\partial C}{\partial z} k - \text{градієнти вологовмісту, } м^{-1};$$

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial x} i + \frac{\partial t}{\partial y} j + \frac{\partial t}{\partial z} k - \text{градієнти температури, } ^{\circ}C / с.$$

Вологовміст матеріалу, за якого здійснюється перехід від постійної швидкості сушіння /пряма АВ на рис.2.1/ до падаючої швидкості сушіння /крива ВС /, називається критичним, а точка В – першою критичною точкою. Для матеріалів, що мають складну структуру на кривих $dc/d\tau = f(c)$ спостерігається друга критична точка, яка відповідає межі вологовмісту, за якої змінюється механізм переміщення вологи у матеріалі.

Швидкість сушіння визначається, як зменшення вологовмісту матеріалу в одиницю часу. З графіка $c = f(\tau)$ швидкість сушіння $dc/d\tau$ можна знайти графічним диференціюванням. Для цього до довільної точки кривої $c = f(\tau)$ проводиться дотична до перетину з віссю τ . Тангенс кута нахилу до осі абсцис визначає швидкість сушіння у цій точці.

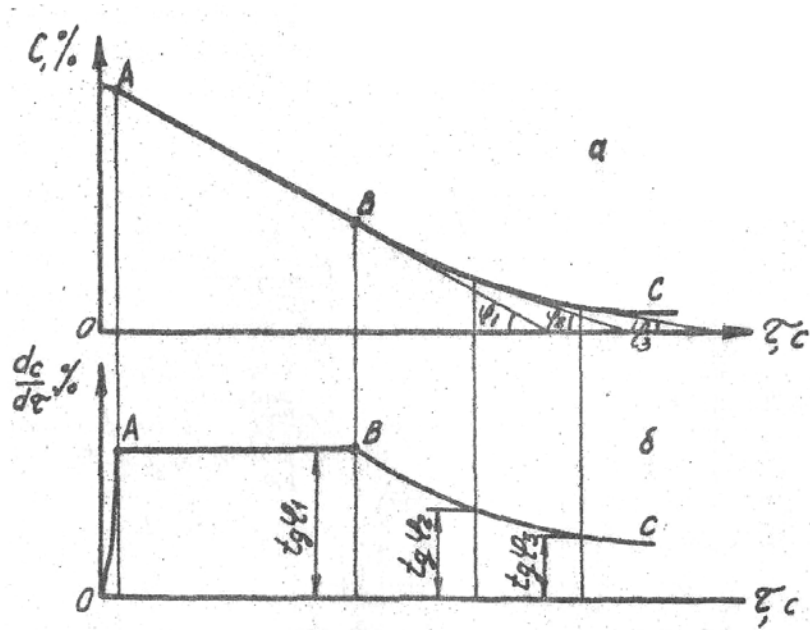


Рис.2.1. Криві сушіння /а/ та швидкості сушіння /б/

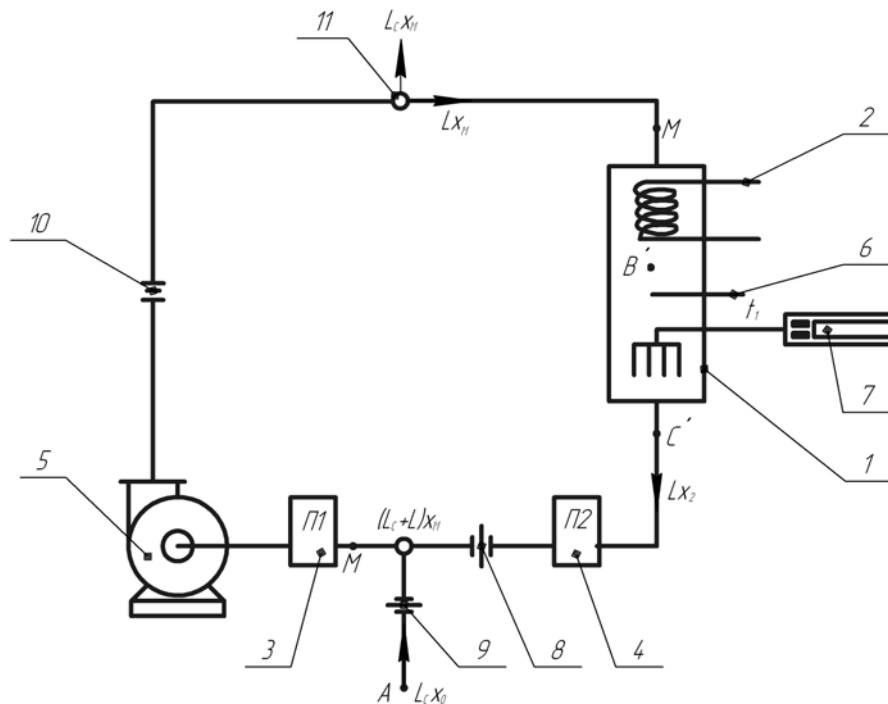
Існують аналітичні рішення кінетики процесу сушіння для кулястих, циліндричних, плоских та деяких інших тіл. При сушінні тіла зі складнішою конфігурацією вирішальне значення у вивченні процесу набувають експериментальні дані.

3. ОПИС СУШАРКИ

Лабораторна сушарка призначається для вивчення процесу конвекційного сушіння з рециркуляцією частки спрацьованого повітря. Установа /рис.3.1/ містить сушильну камеру 1, калорифер 2, психометри 3 і 4 /П1 і П2/ перед калорифером та після сушильної камери, вентилятор 5, термометр 6 перед сушильною камерою, електронні ваги 7 для визначення маси матеріалу, що висушується, шибери 8 – 10 і повітряний патрубок 11 для регулювання витрати повітря.

Матеріал, що висушується, поміщають у сушильній камері на рамці, яка з'єднана з електронними вагами. Реостатом регулюється нагрів спіралі

калорифера і відповідно температура повітряної суміші, яка надходить у сушильну камеру.



1 – сушильна камера; 2 – калорифер; 3,4 – психометри; 5 – вентилятор; 6 – термометр; 7 – електронні ваги; 8, 9, 10 – шибери; 11 – повітряний патрубок

Рис.3.1. Схема сушарки

4.ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

4.1. Перед вимиканням установки необхідно переконатися у наявності заземлення. Калорифер повинен бути вимкнтий.

4.2. При проведенні досліджень електрокалорифер вмикають тільки після пуску вентилятора. Струм у колі калорифера контролюється за допомогою амперметра і не повинен перевищувати 20 А. Вимкнення проводити у зворотному порядку.

4.3. Матеріал, що висушується, слід поміщати у сушильну камеру тільки при вимкненому калорифері.

4.4. Про будь-яку несправність у роботі установки необхідно терміново докласти керівникові робіт. Самостійне усунення виявлених неполадок категорично забороняється.

5. МЕТОДИКА ПРОВЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ І ОСНОВНІ ВИМІРИ

Матеріал, що висушується, занурити на 3...5 хв. у воду. Шибери 8-10 (рис. 3.1) установити в положення, вказане викладачем. Ввімкнути вентилятор, ввімкнути електрокалорифер /струм у колі калорифера установлювати за вказівкою викладача/. При досягненні температури повітря у сушильній камері 30...32 °С необхідно вимкнути електрокалорифер і вентилятор і помістити в сушильну камеру рамку з вологим матеріалом. Через 2 хв. після ввімкнення вентилятора та електрокалорифера з інтервалом у 2 хв. знімати покази психрометрів 3, 4, термометра 6 і електронних вагів 7. Досліди закінчити після припинення зменшення маси матеріалу, що висушується. Результати дослідів занести у таблицю 5.1.

У процесі сушіння вентилятор 5 затягує із сушильної камери I відпрацьоване повітря, а крізь патрубок з шибером 9 - свіже, які за станом на діаграмі проф. Л.К.Рамзіна / I-х діаграмі/ характеризуються відповідно точками C і A /рис. 5.1/. Повітряна суміш M, яку одержують, регулюється шиберами 8 і 9. Частина її викидається крізь патрубок II.

Послідовність вимкнення установки: вивести реостат електрокалорифера у нейтральне положення /до уставлення показів амперметра на позначці "0"/, вимкнути вентилятор.

Таблиця 5.1. Результати експериментів

| Но- мер до- слі- ду | Значення часу, хв. | | Показання психрометрів, °C | | | | Темпе- ратура t_1 , °C | Показанн вагів m, г | Розрахункові величини | | | | | | При- мітка |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---|--|---|---|---|--|---------------|
| | поточ- ний τ | інтервал $\Delta\tau$ | П1 | | П2 | | | | Маса вологого матеріалу m_e , г | Кіль- кість вологи W , г | Зменшення кількості вологи ΔW , г | Вологовміст матеріалу $C = \frac{W}{m_c}$, % | Змен- шення волого- вмісту ΔC , % | Швидкість сушіння $U = \frac{\Delta C}{\Delta\tau}$, % | |
| | | | сухий термо- метр t_M | мокрый термо- метр t'_M | сухий термо- метр t_2 | мокрый термо- метр t'_2 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

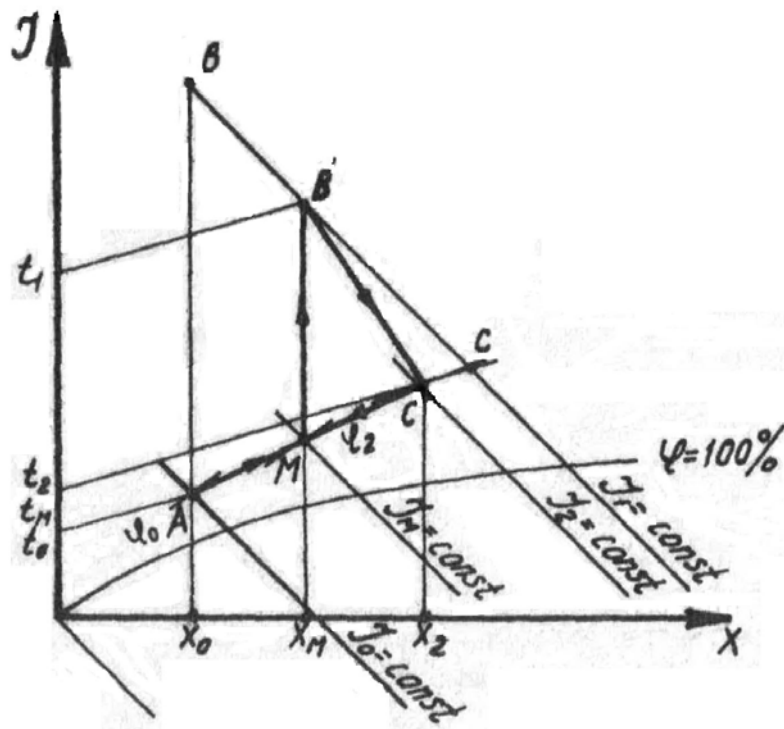


Рис. 5.1. Побудова процесу сушіння матеріалу з рециркуляцією частини спрацьованого повітря на I - x діаграмі

6. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДІВ

1. Обробити одержані дані графоаналітичним методом а допомогою I - x діаграми стану вологого повітря (додаток А).

Процес сушіння в I - x діаграмі зображається за завданням керівника для будь-якого досліду чи серії дослідів.

Відносна вологість свіжого повітря φ_0 визначається з допомогою психрометричної таблиці за показами психрометра $ПО$, що знаходиться в лабораторії. Точка перетину ліній відносної вологості φ_0 та ізотерми t_0 / t . A на рис. 5.1/ характеризує стан свіжого повітря. За показами сухих термометрів психрометрів $П1$ і $П2$ на I - x діаграмі необхідно нанести ізотерми t_M і t_2 . Перетин ізотерми t_2 з лінією постійної відносної вологості

φ_2 , що визначається за допомогою психрометра $П2$, дає точку C' , яка характеризує стан повітря після сушильної камери. З'єднавши точки A і C' прямою, дістанемо лінію мішання свіжого та відпрацьованого повітря. Перетин відрізка AC' та ізотерми t_M дає точку M , за якою визначають параметр суміші перед калорифером. Через те, що повітря, проходячи через калорифер, не змінює вологоємність до попадання у сушильну камеру, перетин лінії $x_M = \text{const}$ та ізотерми t_1 дає точку B' , яка характеризує суміш перед входом до сушильної камери. Нагрів сушильного агенту в калорифері характеризується на діаграмі відрізком MB' . З'єднавши точки B' і C' , дістанемо відрізок $B'C'$, відповідний процесу сушіння. Ламана лінія $AMB'C'$ характеризує послідовність зміни параметрів повітря у сушильній установці. В теоретичній сушарці процес у сушильній камері проходитиме при $I_1 = \text{const}$ /на діаграмі - по лінії $B'C$ /.

Витрата свіжого повітря визначається з рівнянь матеріального балансу сушарки за вологою. Процес сушіння вважається усталеним, втрати відсутні.

Рівняння матеріального балансу сушарки за вологою відповідно лівої та правої частини /див. рис. 3.1/:

$$L_C x_0 + L x_2 = L_C x_M + L x_M \quad (6.1)$$

$$L x_M + W = L x_2, \quad (6.2)$$

де L_C – маса абсолютно сухого свіжого сушильного агенту, кг; L – маса абсолютно сухого повітря, що проходить через сушильну камеру, кг; x_0 – вологовміст свіжого повітря, що надходить з лабораторії, кг (вологи) / кг (абс. сух. повітря); x_2 – вологовміст повітря після сушильної камери, кг (вологи) / кг (абс. сух. повітря); x_M – вологовміст повітря перед калорифером, кг (вологи) / кг (абс. сух. повітря); W – маса вилученої вологи з матеріалу, що висушується, кг.

Рівняння (6.1) та (6.2) перетворимо відповідно на рівняння (6.3) та (6.4):

$$L_C(x_M - x_0) = L(x_2 - x_M); \quad (6.3)$$

$$L(x_2 - x_M) = W. \quad (6.4)$$

Розв'яжемо сумісно рівняння (6.3) і (6.4):

$$L_C(x_M - x_0) = W, \text{ звідки } L_C = \frac{W}{x_M - x_0}.$$

Питома витрата абсолютно сухого повітря*, $\frac{\text{кг (абс. сух. повітря)}}{\text{кг (вологи)}}$:

$$l = \frac{L_C}{W} = \frac{1}{x_M - x_0}.$$

Питому витрату повітря, що проходить через сушильну камеру, визначаємо з рівняння (6.2):

$$l_{CK} = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_M}, \frac{\text{кг (абс. сух. повітря)}}{\text{кг (вологи)}}.$$

Питома витрата повітря, що проходить через вентилятор:

$$l_B = l + l_{CK} = \frac{1}{x_M - x_0} + \frac{1}{x_2 - x_M}, \frac{\text{кг (абс. сух. повітря)}}{\text{кг (вологи)}}.$$

Витрати теплоти дійсної сушарки, Дж/кг /вологи/

$$q = \frac{I_1 - I_M}{x_2 - x_M}.$$

Коефіцієнт рециркуляції n відповідає масі абсолютно сухого повітря у відпрацьованому та тому, що повертається на сушіння, яке припадає на 1 кг абсолютно сухого свіжого повітря, що надходить до сушарки.

* Найбільш економічний режим роботи сушарки буде при подачі свіжого повітря перед сушильною камерою, а викиді частини відпрацьованого повітря – після неї. Тоді $l = 1/(x_2 - x_0)$.

Коефіцієнт рециркуляції n визначається з рівняння матеріального балансу сушарки за вологою сушильного агенту і теплового балансу сушарки:

$$x_M = \frac{x_0 + nx_2}{1 + n}, \frac{\text{кг/вологи/}}{\text{кг/абс.сух.повітря/}};$$

$$I_M = \frac{I_0 + nI_2}{1 + n}, \frac{\text{Дж}}{\text{кг(абс.сух.повітря)}}.$$

Звідси

$$n = \frac{x_M - x_0}{x_2 - x_M} = \frac{I_M - I_0}{I_2 - I_M}.$$

2. Побудувати графік залежності маси води, що міститься у висушуваному матеріалі, від часу сушіння $W = f(\tau)$.

Кількість води, що міститься у матеріалі, г:

$$W = m_g - m_c,$$

де m_g - маса вологого матеріалу в момент виміру, г; m_c - маса сухого матеріалу, г.

3. Побудувати графік змінювання вологовмісту матеріалу з часом $c = f_2(\tau)$ /див. рис. 2.1/.

4. Побудувати криву швидкості сушіння $dc/d\tau = f_3(\tau)$ графічним диференціюванням кривої $c = f_2(\tau)$ /див. розд. 2/.

7. АНАЛІЗ ТА ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

З аналізу теоретичного процесу сушіння з рециркуляцією частини відпрацьованого повітря за допомогою I-x діаграми /див. рис. 5.1/ виходить, що умовою досягнення означеного вологовмісту x_2 при постійній питомій витраті теплоти $q = (I_1 - I_M)/(x_2 - x_M) = const$ є розміщення точки B^1 на ізоентальпії I_1 . При цьому температура t_1 буде тим нижча, чим більший коефіцієнт рециркуляції n .

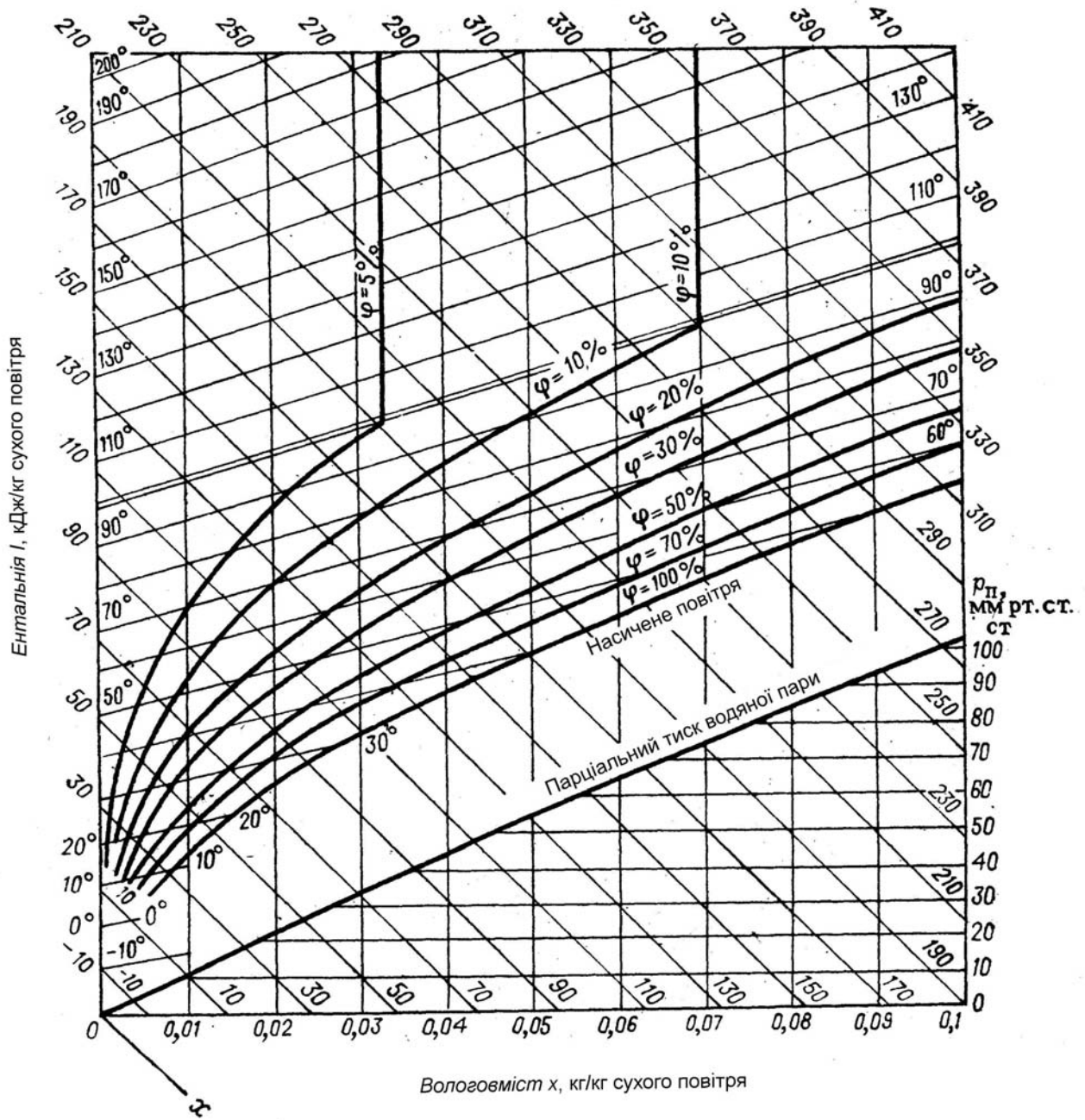
За кривими, що характеризують процес сушіння ($W = f(\tau)$, $c = f_2(\tau)$, $dc/d\tau = f_3(\tau)$), легко визначити момент переходу від I до II періоду сушіння.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДО РОБОТИ

1. Які існують методи видалення вологи з матеріалів?
2. Що таке сушіння і які види сушіння існують?
3. Характерні особливості конвективного сушіння.
4. В яких випадках застосовують сушіння з рециркуляцією частини відпрацьованого сушильного агенту?
5. Що виявляється рушійною силою процесу конвективного сушіння?
6. Які існують форми зв'язку вологи з матеріалом?
7. Чим характеризується процес конвективного сушіння в I періоді?
8. Як протікає конвективне сушіння в II періоді? Які рушійні сили переміщення вологи в цьому періоді?
9. Яка волога видалається в I і II періодах конвективного сушіння?

10. Дати визначення вологовмісту матеріалу і вологовмісту сушильного агенту.
11. Який вологовміст матеріалу називається критичним?
12. Чим визначається і в яких одиницях виражається швидкість сушіння?
13. Від чого залежить швидкість сушіння?
14. Що таке абсолютна і відносна вологість повітря?
15. Що таке температура мокрого термометра і точка роси?
16. Які характеристики вологого повітря можна визначити, використовуючи діаграму Л. К. Рамзіна?

ДОДАТОК А



I-x діаграма стану вологого повітря

I - x діаграма вологого повітря побудована для постійного тиску 745 мм рт. ст. На діаграмі нанесені:

1) лінії постійного вологовмісту $x = \text{const}$, що являють собою вертикальні прямі, які паралельні осі ординат;

2) лінії постійної ентальпії $I = \text{const}$, що являють собою прямі, які йдуть під кутом 135° до горизонту;

3) ізотерми $t = \text{const}$;

4) лінії постійної відносної вологості $\varphi = \text{const}$;

5) лінії парціальних тисків водяної пари p_n у вологому повітрі (значення p_n подані на правій осі ординат).

За будь-якими двома параметрами вологого повітря на I - x діаграмі можна знайти точку, яка характеризує його стан, і визначити всі інші параметри повітря.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. В 2-х кн.: часть 2. Массообменные процессы и аппараты / Ю.И. Дытнерский; изд. 2-е. – М.: Химия, 1995. – 368 с.
2. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
3. Плановський А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии / А. Н. Плановський, П. И. Николаев – М.: Химия, 1972. – 496 с.
4. Муштаев В. И. Сушки дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов – М.: Химия, 1988. – 352 с.
5. Дослідження роботи сушарки з рециркуляцією частки спрацьованого повітря. Метод. вказівки до проведення НДРС з курсу „Процеси та апарати хімічних виробництв” для студентів хіміко-машинобудівного та хіміко-технологічного факультетів усіх форм навчання / Укл. І.А.Андреєв – К.: КПІ, 1993. – 12 с.. – К.: КПІ, 1989. – 12 с.

Навчальне видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СУШАРКИ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ
ЧАСТИНИ СПРАЦЬОВАНОГО ПОВІТРЯ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ НДРС З КУРСУ «ПРОЦЕСИ ТА
АПАРАТИ ХІМІЧНИХ І НАФТОПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ»

Для студентів інженерно-хімічного та хіміко-технологічного факультетів всіх
форм навчання

Укладач:

І.А.Андрєєв, канд. техн. наук