



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



ДОСЛІДЖЕННЯ  
ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ В  
БАРАБАННІЙ СУШАРЦІ

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 ПРОЦЕСУ СУШННЯ СИПУЧИХ  
МАТЕРІАЛІВ В БАРАБАННІЙ СУШАРЦІ

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 та апаратів  
хімічних і нафтопереробних  
виробництв  
Протокол № 4 від 15.10.08 р.

Київ НТУУ «КПІ» 2008

Дослідження процесу сушіння сипучих матеріалів в барабанній сушарці: 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. О.Г. Зубрій, Н.В. Казачинська, В.В. Лукашова – К.: КПІ, 2008. – 18 с.

Укладачі

О.Г. Зубрій, канд. техн. наук, доцент

Н.В.Казачинська, канд. техн. наук, доцент

В.В. Лукашова, канд. техн. наук, асистент

Відповідальний редактор

Я.М.Корнієнко, доктор техн. наук, професор

Рецензент

В.І. Сівецький, канд. техн. наук, професор

## 1. ВСТУП І ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сушінням називають процес видалення вологи з вологих матеріалів шляхом її випаровування. Найбільш поширеним методом проведення цього процесу у промислових умовах є конвективне сушіння. Для здійснення його в хімічній та інших галузях промисловості застосовують конвективні сушарки, в тому числі барабанні.

У конвективній сушарці вологий матеріал стикається з нагрітим газом (сушильним агентом). Випаровування вологи починається з поверхні матеріалу. Пара, що утворюється, дифундує в потік сушильного агенту. Внаслідок цього в матеріалі виникає різниця концентрацій вологи і волога переходить з внутрішніх шарів на поверхню. Спочатку волога з внутрішніх шарів підводиться до поверхні в достатній кількості і швидкість сушіння лишається постійною (1 період сушіння) і визначається швидкістю дифузії вологи в навколишнє середовище, тобто зовнішніми умовами.

Коли кількість вологи, що підводиться до поверхні матеріалу, стає менше тієї кількості, яка може випаруватись, тоді швидкість сушіння починає падати. Цьому моменту відповідає критичний вміст вологи у матеріалі. Період падаючої швидкості (2 період сушіння) продовжується до тих пір, поки матеріал не досягне вмісту вологи, який називається рівноважним. Подалі сушіння стає неможливим. В період, коли швидкість падає процес сушіння залежить від швидкості, з якою волога дифундує до поверхні матеріалу, тобто обумовлена внутрішньою дифузією.

Незалежно від періодів сушіння дослідження процесу складається з двох проблем – дослідження статички сушіння та дослідження кінетики.

Статика процесу сушіння передбачає визначення складових матеріального та теплового балансів сушильної установки.

Завданнями дослідження є:

- 1) дослідна перевірка матеріального і теплового балансів сушильної апарату та установки;
- 2) визначення продуктивності сушарки і напруження барабану по випареній волозі.

## 2. ОПИС УСТАНОВКИ.

Робота проводиться на установці (рис.1), що складається з сушильного барабанного апарату (1), який обертається за допомогою приводу з певною швидкістю, електрокалорифера (6), в якому відбувається підігрів повітря, вентилятора (5), хвостового вентилятора (7), циклона (8).

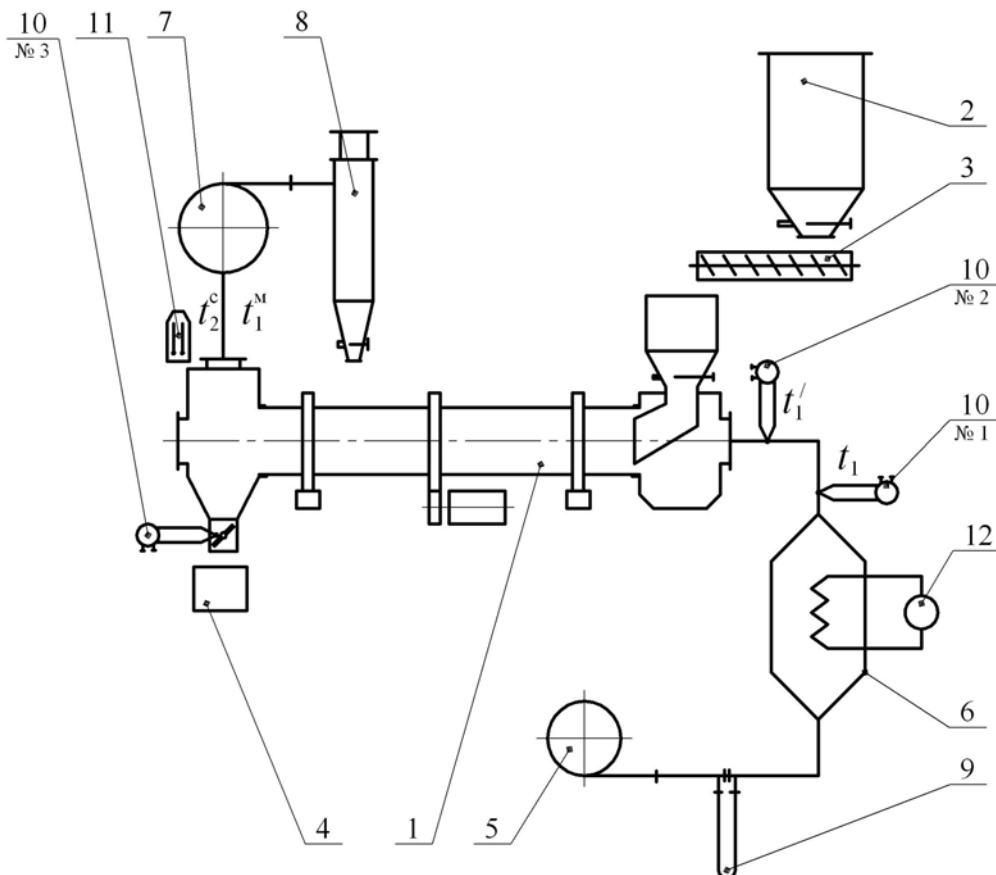


Рис. 1. Схема установки:

- 1 сушильний барабан, 2-бункер, 3- живильник. 4- приймач,  
5- вентилятор, 6- електрокалорифер, 7-вентилятор хвостовий,  
8- циклон, 9 – дифманометр, 10 - термопари, 11 – психометр  $P_2$

Сушарка працює за принципом прямого потоку.

Вологий матеріал поступає з бункера (2) в шнековий живильник (3) і транспортується в завантажувальну камеру сушильного барабана.

Потрапляючи в апарат, що обертається, матеріал пересипається завдяки насадці на внутрішній поверхні барабана і переміщується в потоці гарячого повітря до вивантажувальної камери. Висушений матеріал зсипається приймач (4).

Свіже повітря засмоктується вентилятором (5) з приміщення лабораторії і поступає на підігрів в електрокалорифер (6), потім по повітроводу подається в сушильний барабан. Відпрацьоване повітря хвостовим вентилятором (7) нагнітається в циклон (8), де очищається від пилу, і викидається зовні.

### 3. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Джерелами небезпеки при роботі установки є:

- лінії електроживлення зі змінним струмом напругою 220 в;
- частини, що обертаються;
- електрокалорифер і труби, по яких рухається гаряче повітря.

Тому слід виконувати наступні правила техніки безпеки:

- 1) перед початком роботи переконатися в тому, що установка заземлена;
- 2) перевірити огорожу приводу барабана і шнекового живильника;
- 3) не провертати барабан і шнек вручну;
- 4) з дозволу викладача включити установку, дотримуючись чіткої послідовності запуску окремих агрегатів;
- 5) не торкатися до калорифера і трубопроводів гарячого повітря;
- 6) не торкатися рухомих деталей установки;
- 7) не проводити ремонт на ходу установки;

8) при виявленні неполадок в роботі невідкладно відключити установку.

#### 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ І ОСНОВНІ ВИМІРЮВАННЯ

Об'єктом сушки є чистий річковий пісок. Перед проведенням дослідження необхідно підготувати матеріал для сушки і прогріти сушильну установку.

##### *Підготовка матеріалу.*

Річковий пісок масою не меншого 5 кг змочити водою в кількості не більшій 200-250 г, після чого витримати протягом 20 хв для рівномірного розподілу вологи в ньому. За вказівкою викладача з відібрати проби вологого матеріалу (приблизно по 5 г) в дві бюкси (маса бюксів визначається наперед) для визначення початкової вологості піску.

##### *Підготовка установки до роботи.*

1. Одночасно з підготовкою матеріалу почати прогрівання установки. Для цього відкрити засувку на лінії свіжого повітря і кнопкою пуску на пульті управління установкою увімкнути вентилятор.

2. Включити калорифер і за допомогою трансформатора встановити необхідну потужність (не більше 4 кВт). Під час прогрівання установки і при випробуванні стежити, щоб потужність залишалась постійною.

3. Закрити шибер завантажувальної камери і заслінку на вивантажувальній камері, щоб виключити підсос свіжого повітря в барабанний апарат.

4. Тумблерами "циклон" включити хвостовий вентилятор.

5. Прогрівання барабанної сушарки і повітропроводів завершити протягом 20-30 хв.

### *Проведення випробування.*

Для подачі матеріалу в барабанну сушарку включити привід шнекового живильника і сушильного барабана, відкрити шибери на бункері і завантажувальній камері. При завантаженні барабана вручну, пісок засипати через отвір в завантажувальній камері безперервно і рівномірно невеликими порціями протягом всього випробування. Стежити за розподілом матеріалу в барабані тонким шаром.

За початок випробування прийняти момент засипки першої порції матеріалу в барабан. З цієї миті через кожні 10 хв протягом всього випробування проводити виміри:

- температури матеріалу на вході  $t_1$  і виході  $t_2$  з сушарки;
- параметрів повітря (температури і відносної вологості);
- потужності електронагрівників калорифера;
- перепаду тиску  $\Delta P$  на діафрагмі.

Вимірювання температури здійснюється хромель-копелевими термопарами (10), термоЕРС яких вимірюється за компенсаційною схемою, куди входять перемикач термопар, потенціометр.

Початкова температура матеріалу  $t_1$  визначається мокрим термометром на психрометрі  $\Pi_1$ , який знаходиться в приміщенні лабораторії; кінцева температура висушеного матеріалу  $t_2$  вимірюється термопарою (№3) (рис. 1).

Початкові параметри повітря температура  $t_0$ , та відносна вологість  $\varphi_0$  визначаються по психрометру  $\Pi_1$ ; температура повітря після калорифера  $t_1$ , вимірюється термопарою ( № I), температура безпосередньо перед барабанною сушаркою –  $t_1'$  – термопарою (№2). Кінцеві параметри повітря  $t_2$  і  $\varphi_2$  на виході з сушарки знаходять за допомогою психрометру  $\Pi_2$ , який встановлено у вивантажувальній камері.



Потужність електронагрівників в калорифері вимірює комплекс К-50.

Витрата повітря визначається за перепадом тиску  $\Delta P$  на діафрагмі, який вимірюється диференціальним манометром (9). Крім того визначається маса вологого  $G_n$  і висушеного  $G_k$  матеріалу на лабораторних терезах; час досліду  $\tau$  визначається секундоміром.

Управління установкою здійснюється з пульта, на який виведені всі необхідні кнопки і тумблери з написами, щодо їх призначення.

Тривалість роботи установки визначити часом, за який весь матеріал пройде через барабан і потрапить в приймач сухого матеріалу.

Зважити висушений матеріал і узяти проби сухого матеріалу (приблизно по 5 г.) в два бюкса для визначення кінцевої вологості матеріалу.

У таблицю 1 занести маси проб вологого і сухого матеріалу.

Дані всіх вимірювань занести в таблицю 2 і записати до неї барометричний тиск  $B$ .

## 5. ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Аналітичний розрахунок.

1.1. Визначення початкової і кінцевої вологості матеріалу.

Бюкси з пробами вологого і сухого матеріалу висушити до постійної ваги в сушильній шафі при  $t = 200^\circ\text{C}$ . Результати зважування на аналітичних вагах до і після сушки в сушильній шафі занести в таблицю 1.

Початкову вологість матеріалу для кожної проби визначити за формулою:

$$W = \frac{m_n - m_k}{m_n - m_b},$$

де:  $m_n$  - маса проби матеріалу з буксом до сушки, г;

$m_k$  - маса проби матеріалу з буксом після сушки, г;

$m_b$  - маса бюкса, г.

Середню початкову вологість матеріалу знайти як середнє арифметичне :

$$\bar{W}_n = \frac{W_{n1} + W_{n2}}{2}.$$

Аналогічно визначити середню  $\bar{W}_k$  вологість сухого матеріалу і занести отримані результати в таблицю 1.

1.2. Визначення кількості вологи, випареної в процесі сушки.

Продуктивність установки по вологому матеріалі, кг/с :

$$G_1 = \frac{G_n}{\tau}$$

де  $G_n$  - вага вологого матеріалу, що поступає на сушіння, кг;  $\tau$  - час випробування, с;

Визначення продуктивності сушарки по сухому продукту, кг/с:

$$G_2 = \frac{G_k}{\tau}$$

де  $G_k$  – кількість висушеного матеріалу, кг.

Продуктивність установки по випареній волозі  $W$ , кг/с:

$$W = G_1 \cdot \frac{W_n - W_k}{100 - W_k}$$

Провести перевірку на підставі формули матеріального балансу:

$$W = G_1 - G_2$$

Результати вимірювань вологості матеріалу

Таблиця 1

матеріал	№№ бюксів	Маса бюкса, $m_b$ , Г	Маса проби з бюксом до сушки, $m_n$ , Г	Маса проби з бюксом після сушки, $m_k$ , Г	вологість проби, $W$ , %	Середня вологість матеріалу $\bar{W}$ , %
Вологий	№1					
	№2					
Сухий	№3					
	№4					

Результати вимірювань

Таблиця 2

№	час досліду	показання психрометрів						показання термопар			темпер. матер-лу		різн. тиску	маса матеріалу		Бар. тиск
		П <sub>1</sub>			П <sub>2</sub>			№1	№2	№3		№3				
		$t_0^c$ °C	$t_0^m$ °C	$\varphi_0$ %	$t_2^c$ °C	$t_2^m$ °C	$\varphi_2$ %	$t_1$ °C	$t'_1$ °C	$g_2$ °C	$t_0^m$ $g_1$ °C	$g_2$ °C	$\Delta P$ , мм вод. ст.	$G_n$ кг	$G_k$ кг	$B$ , мм рт. ст.

Визначити об'ємне  $A_v$ , (кг/(м<sup>3</sup> с)), і поверхневе  $A_f$ , (кг/(м<sup>2</sup> с)), напруження барабана по волозі

$$A_v = \frac{W}{V_{\text{бар}}} = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot D^2 \cdot L},$$

$$A_f = \frac{W}{F_{\text{бар}}} = \frac{W}{\pi \cdot D \cdot L},$$

де  $V_{\text{бар}}$ , м<sup>3</sup>, і  $F_{\text{бар}}$ , м<sup>2</sup> - відповідно об'єм і поверхня барабана;

$D$  і  $L$  – відповідно внутрішній діаметр і довжина барабана, м

### 1.3. Визначення витрат повітря на сушіння.

Визначити, користуючись графіком об'ємну витрату повітря  $V$ , м<sup>3</sup>/год, по перепаду  $\Delta P$  тисків на діафрагмі.

Розрахувати масову витрату повітря  $L$ , кг/с:

$$L = V\rho,$$

де  $\rho$ - густина повітря, кг/м<sup>3</sup>

Визначити питому витрату повітря на сушіння  $l$  кг/кг вол.:

$$l = \frac{L}{W}.$$

1.4. Величини, які характеризують стан повітря в окремих точках установки, необхідні для розрахунку теплового балансу.

$\varphi_0$  - відносна вологість повітря, знайдена за психрометричною різницею на психрометрі  $\Pi_1$

$x_0$  – вміст вологи в повітрі, що потрапляє в калорифер, кг вл / кг сп, яке визначається за формулою:

$$x_0 = 0.622 \frac{\varphi_0 \cdot P_{\text{нас}}}{B - \varphi_0 \cdot P_{\text{нас}}}, \quad (1)$$

$x_1 = x_0$ , кг вол/ кг сп – вміст вологості в повітрі, що поступає в сушарку;

$P_{\text{нас}}$  – тиск насиченої пари, мм рт.ст., при  $t_0$ ;

$B$  – загальний барометричний тиск повітря, мм.рт.ст.

$x_2$  – вміст вологи в повітрі, що виходить із сушарки, кг вл / кг сп, розраховується за формулою (1) при відносній вологості повітря  $\phi_2$  та температурі сухого термометра  $t_2^c$ , визначених по психрометру  $\Pi_2$ :

$I_0$  – питома ентальпія вологого повітря, що поступає в калорифер, Дж/кг сп, яка визначається як:

$$I_0 = c_{cn} \cdot t_0^c + (c_n \cdot t_0^c + r) \cdot x_0,$$

де  $c_{cn}$ ,  $c_n$  - теплоємність сухого повітря та водяної пари при  $0^\circ\text{C}$ , відповідно.  $t_0^c$  – температура сухого термометра психрометра  $\Pi_1$ ,  $r$  - питома теплота пароутворення, Дж/кг.

$I_1$  – питома ентальпія вологого повітря, що виходить з калорифера, Дж/кг сп:

$$I_1 = c_{cn} \cdot t_1 + (c_n \cdot t_1 + r) \cdot x_1$$

$I_1'$  - питома ентальпія вологого повітря, що надходить до сушарки, Дж/кг сп:

$$I_1' = c_{cn} \cdot t_1' + (c_n \cdot t_1' + r) \cdot x_1$$

$I_2$  - питома ентальпія вологого повітря, що виходить із сушарки, Дж / кг сп:

$$I_2 = c_{cn} \cdot t_2^c + (c_n \cdot t_2^c + r) \cdot x_2$$

1.5. Витрати тепла на нагрівання повітря в калорифері  $Q_k$ , Вт:

$$Q_k = L \cdot (I_1 - I_0),$$

Питомі витрати тепла на сушіння, Вт/кг вологи:

$$q_c = \frac{L(I_1^1 - I_0)}{W}$$

Результати аналітичного розрахунку занести в таблицю 3.

### 1.6. Тепловий баланс барабанної сушарки.

Прихід тепла, Вт.

Тепло, що вноситься повітрям, в сушарку  $Q_1$  Вт

$$Q_1 = L \cdot I'_1$$

Тепло, що вноситься сухим матеріалом,  $Q_2$ , Вт :

$$Q_2 = G_2 \cdot C_m \cdot \vartheta_1,$$

де  $C_m$  - питома теплоємність піску, приймається 0,80 кДж/(кг·К)

Тепло, яке надходить з вологою матеріалу,  $Q_3$ , Вт :

$$Q_3 = W \cdot \vartheta_1 \cdot C.$$

Загальна кількість тепла, яке надійшло до сушильного барабану,  $Q_{заг}$ , Вт

$$Q_{заг} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Витрати тепла.

Тепло, яке виноситься повітрям із сушарки, Вт

$$Q_1^1 = L \cdot I_2$$

Тепло, що відводиться з висушеним матеріалом, Вт:

$$Q_2^1 = G_2 \cdot C_m \cdot \vartheta_2$$

Тепловий баланс барабанної сушарки

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_1^1 + Q_2^1 + Q_6,$$

Втрати тепла сушаркою в навколишнє середовище,  $Q_6$ , Вт

$$Q_6 = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_1^1 - Q_2^1,$$

### 1.7. Тепловий баланс сушильної установки.

Прихід тепла, Вт.

Тепло, що вноситься повітрям, Вт

$$Q_1 = L \cdot I_0$$

Тепло, що вноситься сухим матеріалом,  $Q_2$ , Вт :

$$Q_2 = G_2 \cdot C_m \cdot \vartheta_1,$$

де  $C_m$  - питома теплоємність піску, в температурних межах від 0-100°C приймається 0,80 кДж/(кг·К)

Тепло, яке надходить з вологою матеріалу,  $Q_3$ , Вт :

$$Q_3 = W \cdot \vartheta_1 \cdot C$$

Тепло, отримане повітрям в калорифері  $Q_k$ , Вт

$$Q_k = L \cdot (I_1 - I_0)$$

Загальна кількість тепла, яке надійшло до сушильної установки,  $Q_{заг}$ , Вт

$$Q_{заг} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_k$$

Витрата тепла, Вт

1. Тепло, яке виноситься повітрям із сушарки, Вт

$$Q_1^1 = L \cdot I_2$$

Тепло, що відводиться з висушеним матеріалом, Вт:

$$Q_2^1 = G_2 \cdot C_m \cdot \vartheta_2$$

Тепловий баланс

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_k = Q_1^1 + Q_2^1 + Q_6,$$

З рівняння теплового балансу визначити втрати тепла в навколишнє середовище  $Q_6$ , Вт:

$$Q_6 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_k - Q_1^1 - Q_2^1,$$

Занести отримані результати до таблиці 3.

### Графоаналітичний розрахунок

Процес сушки в  $I-d$  діаграмі побудувати за даними випробування, табл. 2.

Властивості повітря визначаються за діаграмою.

Приклад побудови процесу сушки в  $I - x$  діаграмі приведений на рис. 2.

### 2.1. Визначення витрат повітря.

Питома витрата повітря  $l$ , кг/кг вол за формулою:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0}$$

Повна витрата повітря  $L$ , кг/с:

$$L = l \cdot W$$

### 2.2. Визначення витрати тепла в установці.

Питома витрата тепла на сушіння за формулою:

$$q_c = l \cdot (I_1^1 - I_0)$$

Визначити повну витрату тепла в калорифері установки за формулою, Вт:

$$Q_k = W \cdot q_k = Wl(I_1 - I_0)$$

Визначення теплових втрат в сушарці.

Визначити величину  $\Delta$ , яка характеризує відхилення дійсного процесу сушіння від теоретичного за формулою:

$$\Delta = l(I_2 - I_1^1)$$

Розрахувати втрати тепла в сушарці за формулою, Вт:

$$Q_s = W\Delta$$

Результати графічного розрахунку  $l$ ,  $L$ ,  $q_c$ ,  $Q_k$ ,  $Q_s$  занести до таблиці 4.



Таблиця 3

Продуктивність установки, кг/с			Витрата повітря кг/с		Витрата тепла		Напруженість барабану по волозі		Втрати тепла Вт
по волог. матеріалу	по сухому матеріалу	по волозі	загальна	питома	загальна, Вт	питома, Вт/кг	об'ємна кг/(м <sup>3</sup> /с)	поверхнева кг/(м <sup>2</sup> /с)	
$G_n$	$G_k$	$W$	$L$	$l$	$Q_k$	$q_c$	$A_v$	$A_f$	$Q_s$

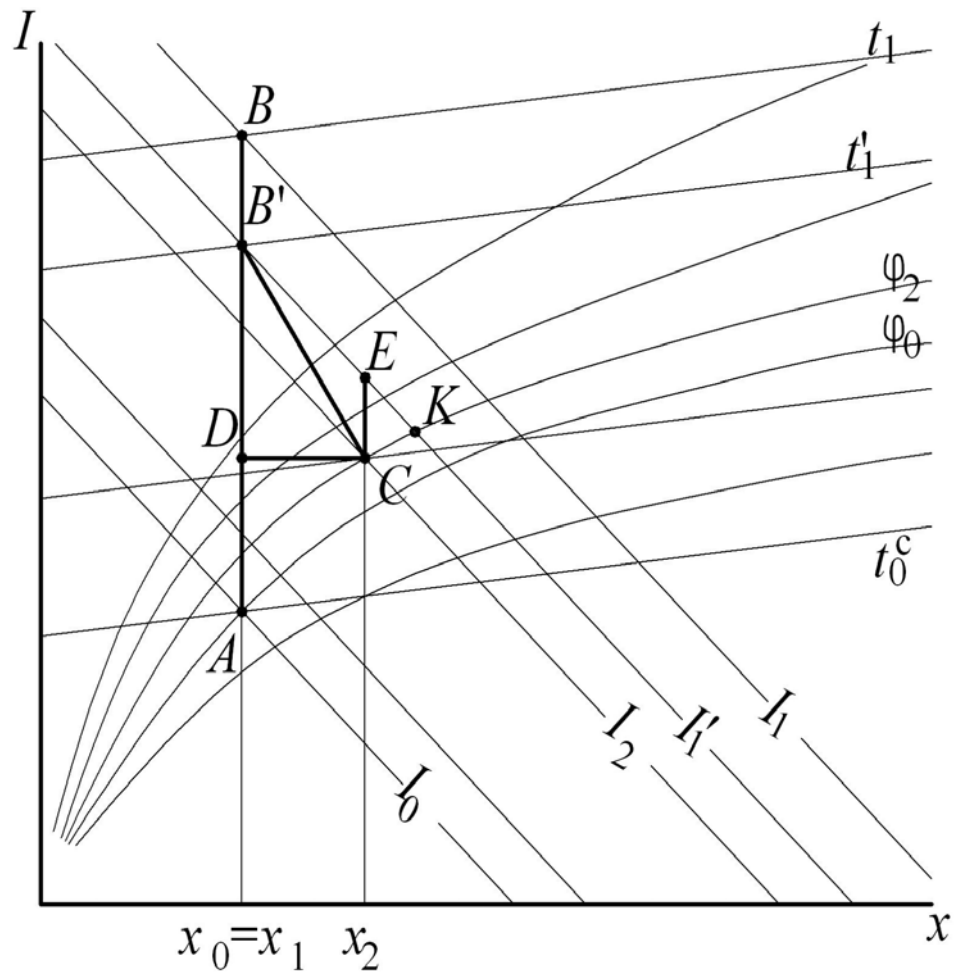


Рис.2. Побудова процесів у сушильній установці у  $I - d$  діаграмі.

Таблиця 4

Вологовміст повітря, кг в/кг сп		Ентальпія повітря Дж/кг				Витрата повітря		Витрата тепла		втрати тепла Вт
						питома	загальна	питома	загальна	
$x_0=x_1$	$x_2$	$I_0$	$I_1$	$I_1'$	$I_2$	$l$	$L$	$q_c$	$Q_k$	$Q_v$

## 6. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Порівняти результати аналітичного і графічного розрахунків, представлених в таблицях 3 і 4, за наступними показниками:

1)  $l$  - питома витрата повітря; 2)  $q_c$  - питома витрата тепла на сушку; 3)  $Q_g$  теплові втрати.

2. Пояснити причини розбіжностей результатів аналітичного і графічного розрахунків.

3. Оцінити теплові втрати в установці і вказати шляхи їх зниження.

4. Оцінити показники інтенсивності сушки  $A_v$  і  $A_f$

5. Визначити шляхи інтенсифікації сушки в барабанних сушарках.

### Список літератури

1. Дытнерский Ю. И. Процеси і апарати хімічної технології: Учебник для вузов. Изд.2-е. В 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995.-368 с.: ил.

2. А.Г. Касаткин «Основные процессы и аппараты химической технологии Изд. 7-е. М.: «Химия», 1960.-829 с.

Навчальне видання

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СИПУЧИХ  
МАТЕРІАЛІВ В БАРАБАННІЙ СУШАРЦІ

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

Укладачі: О.Г. Зубрій, канд. техн. наук  
Н.В.Казачинська, канд. техн. наук  
В.В. Лукашова, канд. техн. наук