

RESEARCH OF THE PROCESS OF AERATION OF A LAYER OF BULK MATERIAL

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЕНТИЛЮВАННЯ ШАРУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ

Yaschuk A., Kirchuk R., Dudarev I.

Lutsk National Technical University / Ukraine

E-mail: rector@lutsk-ntu.com.ua; xxxxyandyxxxx@gmail.com; ruslan-mail@ukr.net

Abstract: The results of theoretical researches of the process of aeration of bulk material in the cylindrical drying chamber of the dryer [1] are suggested in the article.

Keywords: dryer, drying chamber, aeration, pressure loss, porosity

INTRODUCTION

During convective drying the agent of drying (hot air) contacts with wet material and imbibes its moisture. A layer of bulk material resists to passing of drying agent through it. The research of the process of aeration of a layer of bulk material in the suggested dryer [1] will allow to substantiate the rational mode and constructive parameters of the dryer.

MATERIALS AND METHOD

A layer of bulk material which is filled in the cylindrical drying chamber of the dryer [1].

RESULTS

The construction of a dryer [1] with the cylindrical drying chamber (Fig.1) formed by outer cylindrical perforated wall and inner cylindrical perforated wall was suggested. Inner perforated wall is intended to supply of drying agent into the drying chamber. In the drying chamber spiral activators are mounted. The spiral activators are intended for loosening and agitation of material during drying process.

For research of aeration of a layer of bulk material in the dryer of this construction the following assumptions were accepted:

- the material is in a loosened condition [2] during aeration (drying);
- as a result of loosening of material with spiral activators its porosity increases

$$\varepsilon_{\text{ст}} < \varepsilon = f(n, k, D, a, d, \varepsilon_{\text{ст}}),$$

where: n – the frequency of rotation of the activator, [min^{-1}];

k – the pitch of the helix, [m];

D – the diameter of the spiral, [m];

a – the center distance between adjacent activators, [m];

d – the diameter of generatrix of a turn of the helix, [m];

$\varepsilon_{\text{ст}}$ – porosity of material in stationary state.

- drying agent after passing through the inner perforated wall moves to the periphery of the drying chamber perpendicularly to the axis of the cylindrical drying chamber;

- specific mass of drying agent that passes through the layer of material is assumed to be constant at any point of the material, the amount of air supplied to the drying chamber through the inner perforated wall per unit of time is equal to the amount of drying agent, leaving the drying chamber through the outer perforated wall, the velocity of drying agent decreases by its movement from the inner to the outer perforated wall of the drying chamber;

- porosity of material ε varies by the height of the drying chamber due to compaction of material under its own weight. The relationship between the pressure of the material and its porosity are described by a linear law.

Резюме: В статті представлено результати теоретичних досліджень процесу вентиляювання сипкого матеріалу в циліндричній сушильній камері сушарки [1]

Ключові слова: сушарка, сушильна камера, вентиляювання, втрата тиску, шпаруватість

ПЕРЕДУМОВА

В процесі конвективного сушіння сушильний агент (нагріте повітря) контактує з вологим матеріалом, відбираючи в нього вологу. Шар сипкого матеріалу, крізь який проходить сушильний агент, чинить опір його проходженню. Дослідження процесу вентиляювання шару сипкого матеріалу в запропонованій сушарці [1] дозволить обґрунтувати раціональні режимні і конструктивні параметри сушарки.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ

Шар сипкого матеріалу, що заповнює циліндричну сушильну камеру сушарки [1].

РЕЗУЛЬТАТИ

Запропонована конструкція сушарки [1], циліндрична сушильна камера якої (Fig.1) утворена зовнішньою циліндричною перфорованою стінкою і внутрішньою циліндричною перфорованою стінкою. Внутрішня перфорована стінка призначена для підведення сушильного агента в сушильну камеру. В сушильній камері встановлені спіралеподібні активатори. Вони призначені для розпушування і перемішування матеріалу в процесі сушіння.

Для дослідження процесу вентиляювання шару сипкого матеріалу в сушарці даної конструкції було прийнято наступні допущення:

- в процесі вентиляювання (сушіння) матеріал перебуває в розпушеному стані [2];
- в результаті розпушування матеріалу спіралеподібними робочими органами збільшується його шпаруватість

$$\varepsilon_{\text{ст}} < \varepsilon = f(n, k, D, a, d, \varepsilon_{\text{ст}}),$$

де n – частота обертання активатора, [хв^{-1}];

k – крок спіралі, [м];

D – діаметр спіралі, [м];

a – міжосьова відстань між сусідніми активаторами, [м];

d – діаметр твірної витка спіралі, [м];

$\varepsilon_{\text{ст}}$ – шпаруватість матеріалу у стані спокою.

- сушильний агент після проходження крізь внутрішню перфоровану стінку рухається до периферії сушильної камери перпендикулярно до осі циліндричної сушильної камери;

- питома маса сушильного агента, що проходить крізь шар матеріалу приймається постійною у будь-якій точці матеріалу, кількість повітря, що подається в сушильну камеру через внутрішню перфоровану стінку за одиницю часу, рівна кількості сушильного агента, що виходить з сушильної камери через зовнішню перфоровану стінку, при цьому швидкість сушильного агента зменшується при його переміщенні від внутрішньої до зовнішньої перфорованої стінки сушильної камери;

- шпаруватість матеріалу ε неоднакова за висотою сушильної камери внаслідок ущільнення матеріалу під власною вагою. Зв'язок між тиском на матеріал і його шпаруватістю описується лінійним законом.

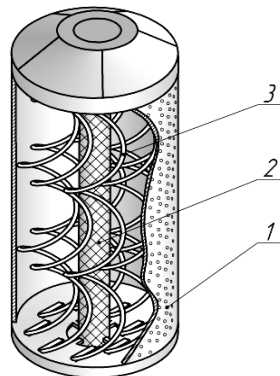


Fig. 1 – The drying chamber of the dryer / Сушільна камера сушарки

1 – outer perforated wall of the drying chamber / зовнішня перфорована стінка сушільної камери; 2 – inner perforated wall of the drying chamber for supplying of drying agent / внутрішня перфорована стінка сушільної камери для подачі сушільного агента; 3 – spiral activators for loosening and agitation of material / спіральні активатори для розпушування і перемішування матеріалу

Consider a layer of material with a constant cross section, conventionally limited by two parallel planes (flat layer) through which the gas stream passes. The loss of pressure in this layer of material can be determined by the formula of Koseni-Carman [3]:

$$\Delta p = K \cdot l \cdot \left(\frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right) \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0, \quad (1)$$

where: Δp – the loss of pressure in the layer of material, [Pa];
 K – the Koseni-Carman constant, $K=4,5 \dots 5$;
 l – thickness of the material in the direction of the gas flow, [m];
 ε – relative porosity of a layer of material;
 s_y – specific surface area of material, [m²/m³];
 μ – dynamic viscosity coefficient, [Pa·s];
 ω_0 – brought flow velocity, [m/s].

Consider a layer of bulk material, which is limited by the outer and the inner cylindrical walls of the dryer of the suggested construction (Fig. 2). During the drying, the agent of drying moves through this layer of material (cylindrical layer) from the inner perforated wall of the drying chamber to the periphery. Assuming that the amount of drying agent that inlets a layer of material is equal to the amount of drying agent at the output of a layer of material and the specific mass of the drying agent is constant at all volume of material, the speed of drying agent ω_x at any point x of material as a function of coordinate of the drying chamber radius can be represented as:

$$\omega_x = \frac{\omega_0 \cdot r_0}{r_0 + l_x} \quad (2)$$

where: r_0 – the inner radius of the drying chamber, [m];
 l_x – the difference between the coordinate of the point x and the inner radius of the drying chamber, [m];
 ω_0 – brought velocity of a flow at the inlet of material, [m].

Розглянемо шар матеріалу з постійним перерізом, умовно обмежений двома паралельними площинами (плоский шар), крізь який проходить газовий потік. Втрату тиску в цьому шарі матеріалу можна визначити за формулою Козені-Кармана [3]:

де: Δp – втрата тиску в шарі матеріалу, [Па];
 K – стала Козені-Кармана, $K=4,5 \dots 5$;
 l – товщина шару матеріалу в напрямку подачі газу, [м];
 ε – відносна пористість шару матеріалу;
 s_y – питома поверхня матеріалу, [м²/м³];
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, [Па·с];
 ω_0 – приведена швидкість потоку, [м/с].

Розглянемо шар сипкого матеріалу, який обмежений зовнішньою і внутрішньою циліндричними стінками сушарки запропонованої конструкції (рис.2). Крізь цей шар матеріалу (циліндричний шар) в процесі сушіння проходить сушільний агент у напрямку від внутрішньої перфорованої стінки сушільної камери до периферії. За умови, що кількість сушільного агента на вході в шар матеріалу рівна кількості сушільного агента на виході з шару матеріалу, а питома маса сушільного агента є постійною за всім об'ємом матеріалу, швидкість сушільного агента ω_x в будь-якій точці x матеріалу як функцію від координати радіуса сушільної камери можна записати у вигляді:

де r_0 – внутрішній радіус сушільної камери, [м];
 l_x – різниця між координатою точки x і внутрішнім радіусом сушільної камери, м;
 ω_0 – приведена швидкість потоку на вході в матеріал, [м].

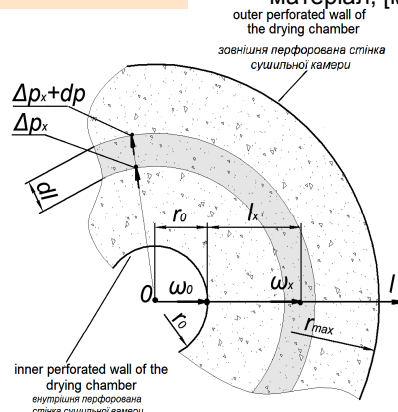


Fig. 2 – Determination of the velocity and the pressure loss of drying agent / Визначення швидкості і втрати тиску сушільного агента

Loss of pressure in the elementary thin layer of material:

Втрата тиску в елементарному тонкому шарі матеріалу:

$$dp = \left(K \cdot l_x \cdot \left(\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right) \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \frac{\omega_0 \cdot r_0}{r_0 + l_x} \right) dl . \quad (3)$$

Integrate and define the loss of pressure Δp_y of cylindrical layer of any thickness $l = r_{\max} - r_0$.

Проінтегруємо і встановимо втрату тиску Δp_y циліндричного шару довільної товщини $l = r_{\max} - r_0$.

$$\Delta p_y = \int \left(K \cdot l \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \frac{\omega_0 \cdot r_0}{r_0 + l_x} \right) dl ,$$

$$\Delta p_y = K \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0 \cdot r_0 \cdot (l - r_0 \cdot \ln(|l + r_0|)) + C , \quad (4)$$

where: C – the constant of integration
Determine the constant of integration if at $l=0$ pressure loss $\Delta p_y = 0$.

де C – стала інтегрування.
Знайдемо сталу інтегрування, якщо при $l=0$ втрата тиску $\Delta p_y = 0$.

$$C = K \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0 \cdot r_0^2 \cdot \ln(|r_0|) \quad (5)$$

Substituting (5) into (4) after simplification we obtain:

Підставивши (5) в (4) після спрощення отримаємо:

$$\Delta p_y = K \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0 \cdot r_0 \cdot (l - r_0 \cdot (\ln(|l + r_0|) + \ln(|r_0|))) \quad (6)$$

Expression (6) allows to determinate the loss of pressure of drying agent as the result of passing it through a layer of material in the cylindrical drying chamber of the dryer.

Вираз (6) дозволяє встановити втрату тиску сушильного агенту в результаті проходження його крізь шар матеріалу в циліндричній сушильній камері сушарки.

Determine the change of porosity of the material by the height of the layer.

Визначимо зміну пористості матеріалу за висотою шару.

Law of compaction in differential form looks like [4]:

Закон ущільнення в диференціальній формі має вигляд [4]:

$$d\varepsilon = -a_0 \cdot dp , \quad (7)$$

where: a_0 – the compression coefficient.

де: a_0 – коефіцієнт стискуваності.

$d\varepsilon$ – the change of the coefficient of porosity with the infinitely small pressure change dp .

$d\varepsilon$ – зміна коефіцієнту шпаруватості при нескінченно малій зміні тиску dp .

Assuming that the pressure of the upper layers of material on lower ones is insignificant the porosity of material in some point y can be determined by compaction law for the straight-line section of compression curve [4]:

Приймаючи, що сила тиску верхніх шарів матеріалу на нижні незначна, шпаруватість матеріалу в довільній його точці y можна визначити за законом ущільнення для прямолінійної ділянки компресійної кривої [4]:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 - a_0 \cdot p_{y.m.} , \quad (8)$$

where: ε_0 – the initial porosity of a material without applied pressure (Fig. 3);

де: ε_0 – початкова шпаруватість матеріалу без прикладеного тиску (рис.3);

$p_{y.m.}$ – the pressure which is produced by higher layers of material on a layer of material in a point y .

$p_{y.m.}$ – тиск, який здійснюють верхні шари матеріалу на шар матеріалу в точці y .

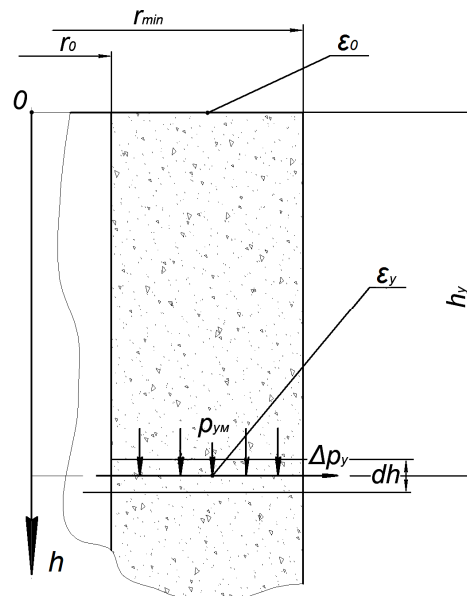


Fig. 3 – Determination of porosity of material depending on its height /
Визначення шпаруватості матеріалу залежно від його висоти

Pressure of upper layers of material can be determined by the formula [4]:

Тиск верхніх шарів матеріалу можна визначити за формулою [4]:

$$p_{y.m} = \frac{m_y}{v_y} \cdot g \cdot h_y, \tag{9}$$

where m_y – the mass of a material height of point y , [kg];
 v_y – the volume of a material height of point y , [m³];

де: m_y – маса матеріалу вище точки y , [кг];
 v_y – об'єм матеріалу вище точки y , [м³].

Relation of the mass to the volume is determined as an average density of a material

Відношення маси до об'єму визначається як середня щільність матеріалу

$$\frac{m_y}{v_y} = \frac{\rho_{vy} - \rho_{v0}}{2} \tag{10}$$

Porosity

Шпаруватість

$$\varepsilon_y = \left(1 - \frac{\rho_{vy}}{\rho_r}\right), \tag{12}$$

$$\varepsilon_0 = \left(1 - \frac{\rho_{v0}}{\rho_r}\right), \tag{13}$$

ρ_r – real density without taking into account porosity, [kg/m³].

ρ_r – дійсна щільність без врахування пор, [кг/м³].

After substitution ρ_{vy} from (12) and ρ_r from (13) into (11) we obtain

Після підстановки ρ_{vy} з (12) і ρ_r з (13) в (11) одержимо.

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 - a_0 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_y) \cdot \left(\frac{\rho_{v0}}{1 - \varepsilon_0}\right) + \rho_{v0}}{2} \cdot g \cdot h_y$$

or

або

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 - a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} + \frac{a_0^2 \cdot g^2 \cdot h_y^2 \cdot \rho_{v0}^2}{2 \cdot \varepsilon_0 + a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} - 2} \tag{14}$$

Substituting the value ε_y of expression (14) into expression (6) the loss of pressure of drying agent when it moves through a layer of a material in the cylindrical drying chamber on the height h_y can be determined.

Підставивши значення ε_y виразу (14) в залежність (6) можна визначити втрату тиску сушильного агента при його проходженні крізь шар матеріалу в циліндричній сушильній камері на висоті h_y .

The results of calculations are represented as graphs on the fig. 4.

Результати розрахунків у вигляді графіків представлені на рис. 4.

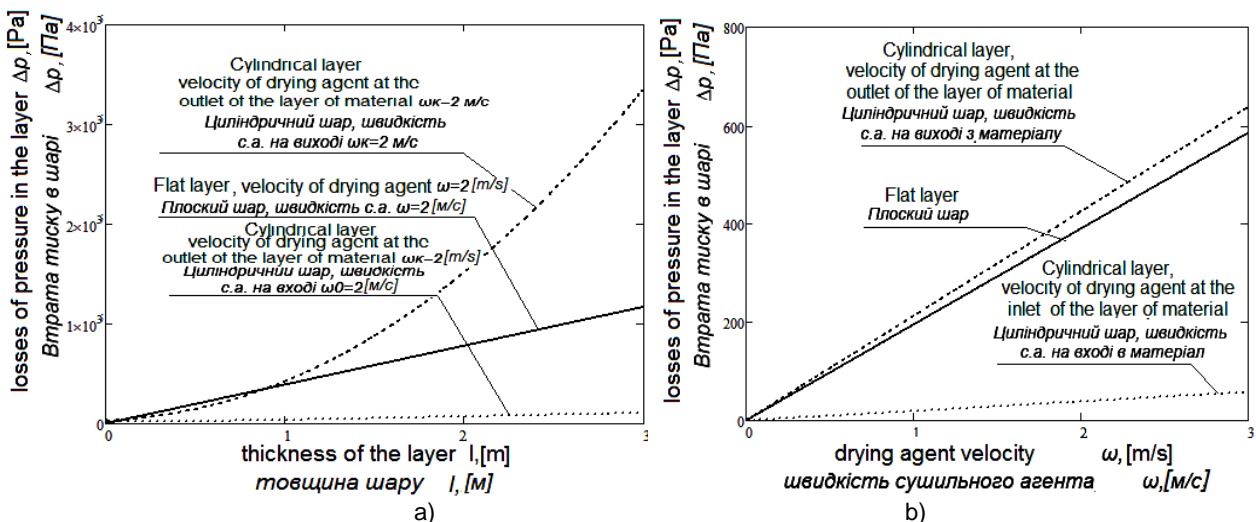


Fig. 4 – Pressure loss of drying agent by passing through a layer of bulk material / Втрата тиску сушильного агента при проходженні крізь шар сипкого матеріалу, $\varepsilon_0 = 0,5$, $\mu = 1,95 \cdot 10^{-5}$, $s = 1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $r_0 = 0,2 \text{ м}$:

- a) depending on the thickness l with the velocity $\omega = 2 \text{ [m/s]}$ / залежно від товщини шару l при швидкості $\omega = 2 \text{ [m/s]}$;
- b) depending on the velocity of the drying agent ω for $l = 1 \text{ [m]}$ / залежно від швидкості сушильного агента ω при $l = 1 \text{ [m]}$

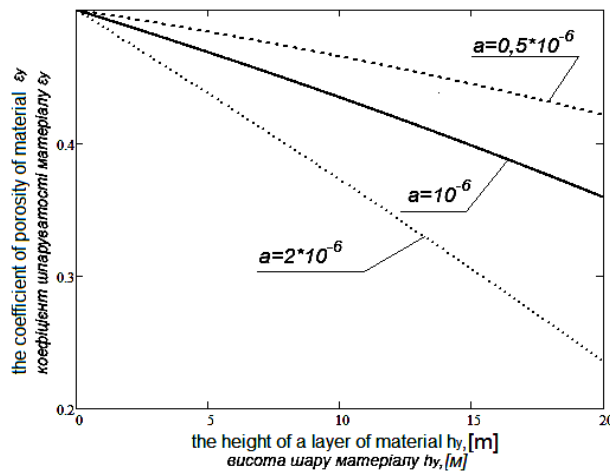


Fig. 5 – Dependence of the porosity from material layer height / Залежність коефіцієнта шпаруватості від висоти шару матеріалу

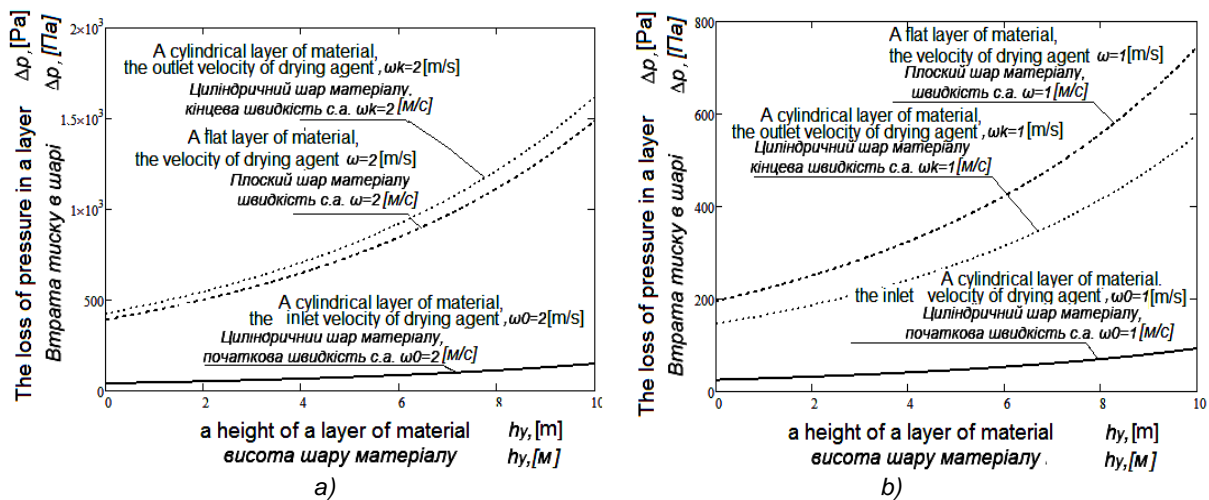


Fig. 6 – Changing of a material layer resistance to the airflow in height / Зміна опору шару матеріалу повітряному потоку за висотою

a) $\omega = 2$ [m/s]; $l = 1$ [m], b) $\omega = 1$ [m/s]; $l = 0,5$ [m]

The resistance of material, which fills a cylindrical drying chamber with a height $h_{c.k.}$.

Опір матеріалу, що заповнює циліндричну сушильну камеру висотою $h_{c.k.}$.

$$\Delta p_{c.k.} = \frac{1}{h_{c.k.}} \cdot \int_0^{h_{c.k.}} \Delta p_y = K \cdot \frac{\left(1 - \left(\varepsilon_0 - a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} + \frac{a_0^2 \cdot g^2 \cdot h_y^2 \cdot \rho_{v0}^2}{2 \cdot \varepsilon_0 + a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} - 2} \right) \right)^2}{\left(\varepsilon_0 - a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} + \frac{a_0^2 \cdot g^2 \cdot h_y^2 \cdot \rho_{v0}^2}{2 \cdot \varepsilon_0 + a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} - 2} \right)^3} \times \times s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0 \cdot r_0 \cdot (l - r_0 \cdot (\ln(|l + r_0|) + \ln(|r_0|))) dh_y \quad (14)$$

After integrating and simplification:

Після інтегрування і спрощення:

$$\Delta p_{c.k.} = \frac{A \cdot D^3}{B \cdot E} \cdot \left(\frac{\left(16 \cdot D \cdot (B \cdot h \cdot E \cdot (2 \cdot \varepsilon - 1) - 2 \cdot \varepsilon \cdot (2 \cdot E \cdot \varepsilon + 3) + 2) \right)}{(B \cdot h \cdot E - 2 \cdot D \cdot \varepsilon)^2} - 4 \cdot \ln \left(\frac{B \cdot h \cdot E - 2 \cdot D \cdot \varepsilon}{B \cdot E} \right) \cdot (\varepsilon + 1) - B \cdot \frac{E}{D} \right) \cdot \left(\varepsilon - a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} + \frac{a_0^2 \cdot g^2 \cdot h_y^2 \cdot \rho_{v0}^2}{2 \cdot \varepsilon_0 + a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} - 2} \right) \cdot (l - r_0 \cdot (\ln(|l + r_0|) - \ln(|r_0|))) \quad (15)$$

$$A = K \cdot \mu \cdot r_0 \cdot s_y^2 \cdot \omega \cdot (l - r_0 \cdot (\ln(|l + r_0|) - \ln(|r_0|))),$$

$$B = a_0 \cdot g \cdot \rho_{v0},$$

$$D = (\varepsilon - 1),$$

$$E = (\varepsilon - 1),$$

where: A, B, D, E – coefficients.

System (15) describes the loss of pressure of drying agent when it moves through a layer of bulk material with its height $h_{c.k.}$ which fills the cylindrical drying chamber with the radius of outer perforated wall r_{max} and the radius of inner perforated wall r_{min} .

де A, B, D, E – коефіцієнти.

Система (15) характеризує втрату тиску сушильним агентом при його проходженні крізь шар матеріалу висотою $h_{c.k.}$, що заповнює циліндричну сушильну камеру з радіусом зовнішньої перфорованої стінки r_{max} і радіусом внутрішньої перфорованої стінки r_{min} .

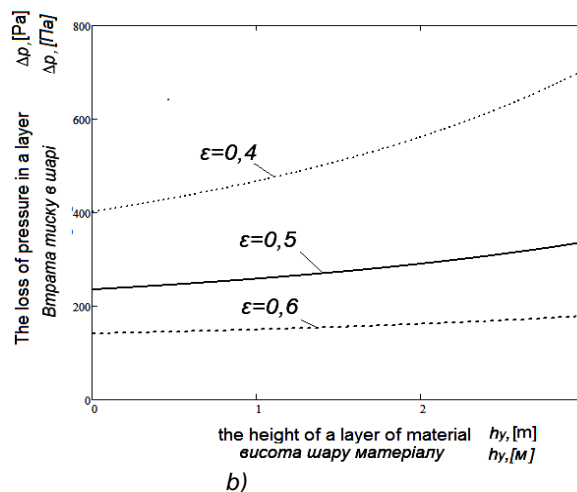
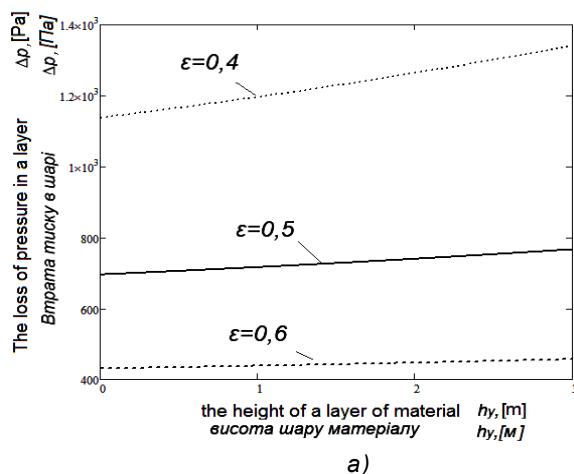


Fig. 7 – Drying agent pressure loss to overcome the resistance of material in the cylindrical drying chamber of the dryer / Втрата тиску сушильним агентом на подолання опору матеріалу в циліндричній сушильній камері сушарки

a) $a_0 = 2 \cdot 10^{-6}$; b) $a_0 = 5 \cdot 10^{-6}$

CONCLUSIONS

The relations which allow calculating the resistance of a bulk material layer in the cylindrical drying chamber of the dryer taking into account the change of porosity of material by height were obtained. The obtained results indicate that a flat and a cylindrical layer of material produce different resistances of drying agent for the same initial speed of the agent of drying. The less resistance Δp_{ci} of a cylindrical layer than a flat layer with the same thickness l and initial velocity of the drying agent ω_0 entering into the material can be explained by a decreasing of the speed of the drying agent in a cylindrical drying chamber as a result of moving it from the center to the periphery: $\omega_x = f(l_x)$.

REFERENCES

- [1]. Yaschuk A.A., Kirchuk R.V., Didukh V. F. (2011) – *Dryer for bulk materials*, Patent № 69227 Ukraine, IPC F26 B17/12, F26 B17/18; application 26.09.2011, publ. 25.04.2012, Bulletin №8;
- [2]. Malin N. I. (2004) - *Energy-saving drying of grain* — M.: Colos, 240 pg;
- [3]. Mushtaev V.I., Ulyanov V.M. (1988) - *Drying of disperse materials*: Industrial and practical edition - M.: Chimiya, 352 pg. III;
- [4]. Tsytoich N.A. (1983) - *Soil Mechanics* (short course): Handbook for high schools of building, 4th ed., Rev. and completed. M.: Vysh. sch.;
- [5]. Fichtenholz G.M. (1966) - *Differential and integral calculus*, In 3 Vols (Vol.2) – M.: Fizmatlit.

ВИСНОВКИ

Отримано залежності, які дозволяють обчислити опір шару сипкого матеріалу в циліндричній сушильній камері сушарки з врахуванням зміни шпаруватості матеріалу за висотою шару. Отримані результати показують, що при однаковій початковій швидкості сушильного агента плоский і циліндричний шар матеріалу чинять різний опір сушильному агенту. Менший опір Δp_{ci} циліндричного шару, ніж плоского, при однаковій їх товщині l і початкової швидкості сушильного агента ω_0 на вході в матеріал можна пояснити зменшенням швидкості сушильного агента в циліндричній сушильній камері внаслідок переміщення його від центру до периферії $\omega_x = f(l_x)$.

БІБЛІОГРАФІЯ

- [1]. Ящук А.А., Кірчук Р. В., Дідух В.Ф. (2011) - *Сушарка для сипких матеріалів*, Пат. № 69227 Україна, МПК F26 B17/12, F26 B17/18; заявл. 26.09.2011; опубл. 25.04.2012, бюл. № 8.
- [2]. Малин Н. И. (2004) - *Енергосберегающая сушка зерна* — М.: Колос, 240 с.
- [3]. Муштаев В.И., Ульянов В.М. (1988) - *Сушка дисперсных материалов*, Производственно-практическое издание. — М. : Химия, 352 с. : ил;
- [4]. Цытович Н.А. (1983) - *Механика грунтов* (краткий курс): Учебник для строит, вузов. 4-е изд., перераб. И доп. — М.: Высш. шк;
- [5]. Фихтенгольц Г.М. (1966) - *Курс дифференциального и интегрального исчисления*. В 3-х т. (Т.2). – М.:Физматлит.