

УДК 621.87

**М. В. ЯКИМЧУК**, кандидат технічних наук,

**О.М. ГАВВА**, доктор технічних наук,

**А.Є. САМОЙЛИК**

*Національний університет харчових технологій*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТ ПОВІТРЯ ЧЕРЕЗ ПОРИСТІ ПАКУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ**

*Розроблена математична модель повітропроникності пористих пакувальних матеріалів. Адекватність математичної моделі реальним процесам перевірено експериментальними дослідженнями.*

*Отримані результати досліджень рекомендовані для застосування під час виконання розрахунків та вибору елементів вакуумних захоплюючих пристроїв пакувального обладнання.*

**Ключові слова:** *пористий пакувальний матеріал, повітропроникність, упаковка, картон, математичні моделі, витрати повітря.*

*Разработана математическая модель воздухопроницаемости пористых упаковочных материалов. Адекватность математической модели реальным процессам проверено экспериментальными исследованиями.*

*Полученные результаты исследований рекомендованы для применения при выполнении расчетов и выбора элементов вакуумных захватывающих устройств упаковочного оборудования.*

**Ключевые слова:** *пористый упаковочный материал, воздухопроницаемость, упаковка, картон, математические модели, расход воздуха.*

*A mathematical model for air permeability of porous packaging materials. The adequacy of mathematical models to real processes tested by experimental studies. The results obtained are recommended for use in performing the calculations and the choice of the elements of vacuum gripping device packaging equipment.*

**Keywords:** *porous packaging material, breathable, packaging, cardboard,*

---

© М. В. Якимчук, О.М. Гавва, А.Є. Самойлик, 2010



Сьогодення пакувальної індустрії характеризується розробкою та використанням великої номенклатури пакувальних матеріалів, які мають різну масу, суттєво відрізняються між собою фізико-хімічними та механічними характеристиками та здатністю забезпечити умови виготовлення оригінальної та функціональної споживчої упаковки для будь-якого харчового продукту.

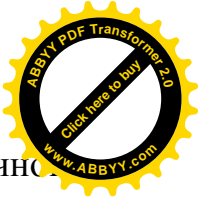
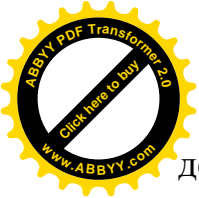
Упаковки, залежно від здатності зберігати форму, умовно розділяють на дві групи: жорсткі та м'які. Жорсткими називають такі упаковки, які під дією зовнішнього навантаження зберігають початкову форму та розміри. Як правило, найбільш поширеним матеріалом із якого виготовляють жорсткі упаковки є картон. Однією із характеристик картону, як об'єкту переміщення вакуумними захоплюючими пристроями є його пористість, яку можна характеризувати повітропроникністю. Величина повітропроникності картону суттєво впливає на подальше його використання, як пакувального матеріалу, та на конструктивне виконання робочих органів пакувальних машин, особливо при застосуванні вакуумних захоплюючих пристроїв.

Метою даної роботи було аналітично дослідити витрати повітря через матеріали упаковок, які мають пористу структуру .

Для розрахунку параметрів газового потоку через пористий об'єкт були прийняті такі припущення: реальний об'єкт (упаковка) був замінений пластинкою постійної товщини  $b_{ом}$ , яка рівномірно пронизана системою капілярів (Рис.1); пластинка є досить жорсткою; переміщення повітря в порах об'єкта та проміжку  $h_{pv}$  є ламінарним; термодинамічний процес зміни стану повітря в порах об'єкта є ізотермічним.

Об'ємні витрати  $Q_x$  повітря через капіляр у точці  $x$  капіляра можна визначити за формулою, що адекватна виразу для переміщення рідини, що не стискається [1]:

$$Q_x = -\frac{\pi \cdot r_{кн}^4}{8 \cdot \mu_0} \frac{dP_x}{dx}, \quad (1)$$



де  $r_{\text{кп}}$  - радіус капіляра, м;  $\mu_0 = 1,71 \cdot 10^{-5} + 4,94 \cdot 10^{-8} t$  - коефіцієнт динамічної

в'язкості повітря, кг/(с·м);  $t$  - температура повітря, °C;  $\frac{dP_x}{dx}$  - градієнт тиску

повітря у точці  $x$  капіляра.

Внаслідок пружних властивостей повітря об'ємна витрата та похідна  $\frac{dP_x}{dx}$  є величинами змінними по довжині капіляра. Для визначення градієнта тиску використаємо умову сталості масової витрати:

$$Q_x \cdot \rho_x = \text{const}, \quad (2)$$

де  $\rho_x$  - питома маса повітря у точці  $x$  капіляра, кг/м<sup>3</sup>.

Коливання температури повітря при його переміщенні через пористу заготовку незначні, тому справедливе ізотермічне співвідношення [2]:

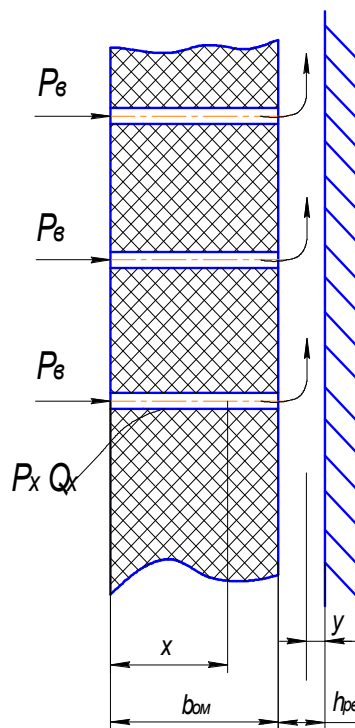
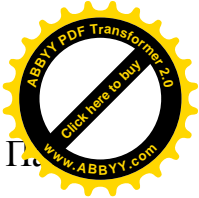
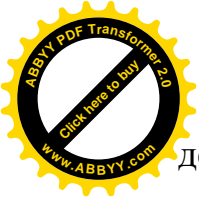


Рис. 1 Схема для розрахунку витрат повітря через плоский пористий матеріал

$$\frac{\rho_x}{P_x} = \frac{1}{R \cdot T_a} = \text{const}, \quad (3)$$



де  $P_x$  - абсолютний тиск повітря у перерізі  $x$  капіляра,  $P_a$  - атмосферний тиск;  
 $R = 287,14$  Дж/(кг·К) - газова стала для повітря;  $T_a$  - абсолютна температура атмосферного повітря, К.

Отже, рівняння нерозривності ізотермічного газового потоку в капілярі має виглядає :

$$Q_x \cdot P_x = -\frac{\pi \cdot r_{kn}^4}{8\mu_\delta} \cdot \frac{dP_x}{dx} \cdot P_x = const, \quad (4)$$

тобто диференціальна частина рівняння (4) має вигляд

$$\frac{dP_x}{dx} \cdot P_x = const. \quad (5)$$

Інтегрування рівняння (5) з урахуванням граничних умов  $x=0, P_x=P_a$ ; та  $x=b_{om}; P_x=P_r$  дає можливість знайти розподіл тиску по довжині капіляра

$$P_x^2 = \frac{P_r^2 - P_a^2}{b_{om}} \cdot x + P_a^2. \quad (6)$$

Тоді похідна

$$\frac{dP_x}{dx} = \frac{P_r^2 - P_a^2}{2 \cdot P_x \cdot b_{om}}. \quad (7)$$

Підставивши вираз (7) у формулу (1), знайдемо об'ємну витрату повітря через переріз  $x$  капіляра:

$$Q_x = \frac{\pi \cdot r_{kn}^4}{16\mu_\delta \cdot b_{om}} \cdot \frac{P_a^2 - P_r^2}{P_x}. \quad (8)$$

З останньої формули можна зробити висновок, що об'ємна витрата повітря  $dQ_n$  на виході з елементарної площадки  $dS$  пористого об'єкту пропорційна різниці квадратів тисків на вході та на виході з нього і визначається за рівнянням (9):

$$dQ_n = \frac{\xi}{\mu_\delta \cdot b_{om}} \cdot \frac{P_a - P_r}{P_r} dS, \quad (9)$$

, де  $\xi$  - коефіцієнт пропорційності, що характеризує проникність пакувального матеріалу заготовки,  $m^2$ .

Якщо задатись площею заготовки, то об'ємну витрату повітря  $Q_e$  можна визначити з рівняння

$$Q_e = \frac{\xi}{\mu_\delta \cdot b_{ом}} \cdot \frac{P_e^2 - P_a^2}{P_e} \cdot S_e, \tag{10}$$

За таких умов з рівняння (10) можна визначити коефіцієнт пропорційності  $\xi$ , що характеризує проникність матеріалу

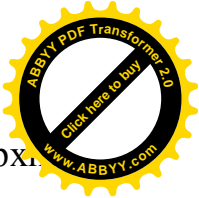
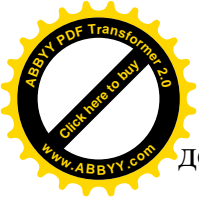
$$\xi = \frac{Q_e \cdot b_{ом} \cdot \mu_\delta}{S_e} \cdot \frac{P_e}{P_e^2 - P_a^2}. \tag{11}$$

Об'ємну витрату повітря  $Q_e$  для картонних матеріалів було визначити також експериментально за допомогою лабораторної установки Messmer Buchel K513 (Рис.2). В основу роботи установки покладено дослідження повітропроникненості методом Бендтсена, що відповідає загальноприйнятим вимогам для таких пристроїв у відповідності до стандарту ISO 5636-3.



Рис.2 Загальний вигляд лабораторної установки Messmer Buchel K513 для визначення повітропроникненості повітря через пористі матеріали

Повітропроникність картону за Бендтсеном визначалась як середня величина повітряного потоку через паперовий зразок, що був затиснений між металевим кільцем і гумовою прокладкою. Площа поверхні картону, що

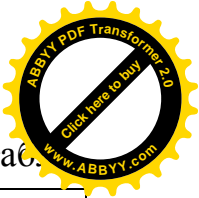
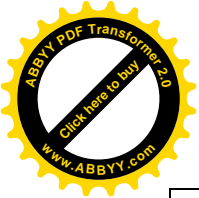


досліджувався становила  $10\text{см}^2$ . Металеve кільце притискали до поверхні картону спеціальним пристроєм, забезпечуючи тиск  $100\text{кПа}$ . Далі через кільце подавали стиснене повітря з абсолютним тиском  $P_e$  межах  $140..150\text{кПа}$ . Повітря пропускали через товщину заготовки з подальшим вимірюванням його кількості на виході з неї.

В таблиці наведено порівняльну характеристику аналітичних та експериментальних значень витрат повітря через поверхню пористих картонних матеріалів.

### Аналітичні та експериментальні значення повітропроникності картону

Марка картону	Технічна характеристика		Повітропроникність, мл/хв.		Похибка, %
	маса, $1\text{м}^2\text{г}$	товщина, мм	експеримент.	аналітична	
1	2	3	4	5	6
хром – ерзац макулатурний марки Н першого сорту по ТУ У 05509659-008-2000	$300\pm 1$ 5	$0,40\pm 0,02$	62	64	3,2
макулатурний марки НМ ТУ У 21.1 - 05509659-008-2001	$290\pm 1$ 5	$0,40\pm 0,02$	77	74	3,9
тарний макулатурний КТ - 25 ТУ У 21.1 - 05509659-026:2005	$175\pm 1$ 0	$0,38\pm 0,03$	139	144	3,59



Продовження таб.

1	2	3	4	5	6
для площинних шарів гофрованого картону К – 2 ГОСТ 7420 – 89	175±1 2	0,35±0,03	122	118	3,3
макулатурний марки ММ ТУ У 21.1-05509659-020-2001	310±1 5	0,40±0,02	78	75	3,8
Папір для гофрування Б-2	125±6	0,35±0,02	86	89	3,5%

Експериментальні результати повітропроникності підтвердили адекватність математичної моделі реальним процесам.

**Висновки:** Результати виконаних досліджень можна рекомендувати проектним і машинобудівним підприємствам і організаціям для використання під час створення ефективних зразків вакуумних захоплюючих пристроїв при виконанні технологічних операцій з пористими пакувальними матеріалами.

### Список літератури

1. *Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г.* Основы пневмоавтоматики. – М.: Машиностроение, 1973. – 360 с.
2. *Дейч М.Е.* Техническая газодинамика. – М.: - Энергия, 1974. – 592с.

*Одержана редколлегією 25.01.2011*