

УДК 674.047

**Експериментальне дослідження тепло- та масопереносу в твердих дисперсних матеріалах при пародепресійному сушінні**  
**А.Г. КОЛІЄНКО<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, професор,**  
**О.В. ШЕЛІМАНОВА<sup>2)</sup>, кандидат технічних наук, доцент**  
**Д.Ю. Білецький<sup>2)</sup>, студент**

<sup>1)</sup> *Національний університет Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка*

<sup>2)</sup> *Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*Анотація.*, *Інтенсивність протікання технологічних процесів за участі дисперсних матеріалів найчастіше лімітується саме швидкістю внутрішнього перенесення маси, Пародепресійний метод сушіння, розроблений науковцями ІТТФ НАН України, дозволяє інтенсифікувати внутрішній волоперенос і створює, таким чином, передумови для прискорення процесу сушіння.*

*Процес пародепресійного сушіння детально розглянутий в літературі для випадку сушіння катиллярно-пористого тіла – листової штукатурки.*

*Мета даного дослідження – розглянути вплив паропроникної оболонки на інтенсифікацію внутрішнього масопереносу при сушінні катилірно-пористого колоїдного тіла – віскозного волокна.*

*В експериментальних дослідженнях були використані звичайні трикотажні оболонки та оболонки з підвищеною щільністю, а також сукняні та паперові оболонки. Зафіксовано відсутність чітко вираженого періоду постійної швидкості сушіння, що свідчить про низьку інтенсивність перенесення вологи в матеріалі. Найбільші значення швидкості сушіння досягаються при застосуванні одинарної трикотажної оболонки, найнижчі – при зневодненні волокна в сукняній оболонці.*

*Отримані експериментальні дані можуть бути використані для розробки ефективних методів управління процесами сушіння твердих дисперсних тіл.*

**Ключові слова:** *пародепресійне сушіння, тверді дисперсні тіла, паропроникна оболонка, швидкість сушіння*

**Актуальність.** *Інтенсивність сушіння матеріалів, як одного з найбільш енергоємних технологічних процесів, у багатьох випадках регламентує продуктивність всієї технологічної лінії [1]. В той же час у технологічних процесах різних галузей промисловості широко поширене перенесення теплоти і маси в твердих дисперсних матеріалах - зволоження, сушіння, просочення, екстракція, мембранний поділ рідких і газоподібних речовин, тощо [2]. Інтенсивність протікання технологічних процесів за участі дисперсних матеріалів*

найчастіше лімітується саме швидкістю внутрішнього перенесення маси, яка визначає як продуктивність технологічного обладнання, так і якість одержуваної продукції. Таким чином, інтенсифікувати процес сушіння загалом вдається без прискорення внутрішнього масопереносу. Все це і визначає актуальність досліджень внутрішнього тепломасопереносу в дисперсних матеріалах, з метою розробки практичних методів управління тепломасообмінними процесами та створення на цій основі нових енергоресурсозберігаючих технологій гіротермічної обробки дисперсних матеріалів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Інтенсивність перенесення вологи в матеріалах визначається їх видом, структурними характеристиками та температурою. Особливо впливовим фактором інтенсифікації переносу є температура матеріалу. Зважаючи на це, в Інституті технічної теплофізики НАН України було розроблено високоінтенсивні методи сушіння, такі як сушіння високотемпературним вологим теплоносієм та пародепресійний метод сушіння [3,4].

Пародепресійний метод сушіння вологих матеріалів полягає в тому, що матеріал, що сушиться, поміщається в паропроникну пористу оболонку. При цьому інтенсивність випаровування знижується завдяки опору перенесення вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище, який створюється оболонкою. Внаслідок цього температура матеріалу підвищується, що й призводить до прискорення внутрішнього вологопереносу і створює передумови для інтенсифікації процесу сушіння. За певних поєднань режимних параметрів вдається не тільки компенсувати уповільнення зовнішнього теплообміну поверхні матеріалу з навколишнім середовищем, а і забезпечити загальне прискорення процесу сушіння.

Управляти швидкістю внутрішнього масопереносу можна накладенням електричних високочастотних полів неоднорідних електричних і магнітних полів, а також добавками поверхнево-активних речовин відзначити, що поверхнево-активні речовини (ПАР) знайшли широке застосування в різних галузях народного господарства [5]. Це визначається тим, що, концентруючись на різних

поверхнях розділу, вони утворюють найтонші адсорбційні шари, що різко змінюють властивості поверхонь розділу.

При цьому змінюються кінетика процесу переходу речовини через поверхні розділу фаз і умови взаємодії дотичних фаз, що дозволяє малими добавками ПАР змінювати хід фізико-механічних процесів.

Властивості повітропроникних оболонок істотно впливають не тільки на швидкість вологопереносу в матеріалах, характер і інтенсивність процесу сушіння, а й на якість висушеного матеріалу.

Автори [6] досліджували вплив оболонок на інтенсифікацію внутрішнього масопереносу на прикладі сушіння катильярно-пористого тіла – листової штукатурки

Якісне сушіння листової штукатурки, що складається з гіпсового сердечника і двох листів картону, здійснюється зазвичай при початковій температурі теплоносія 150 – 160°C зі зниженням її наприкінці процесу до 60°C, що може викликати деградацію гіпсу та пов'язаного з нею відклеювання картону. Час сушіння матеріалу при зазначених параметрах теплоносія становить 50 – 60 хв. Деградація гіпсу, відбувається в момент настання другої критичної вологості матеріалу при поглибленні зони випаровування, оскільки спостерігається різке підвищення температури зневоднених вище 70°C. Однак за наявності надмірної вологи гіпс не деградує навіть за підвищення температури понад 70°C.

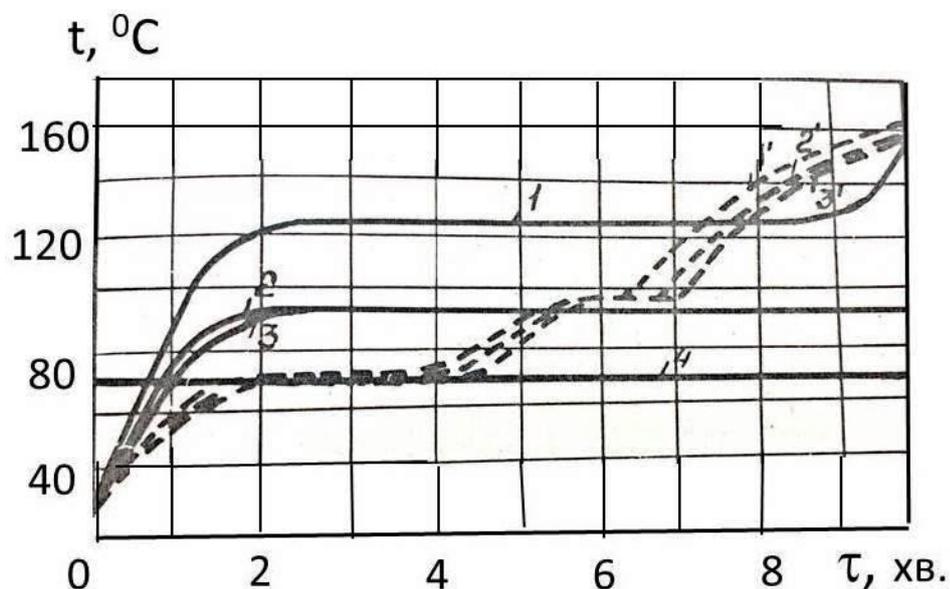
Температуру однорідної гіпсової пластини в першому періоді сушіння можна підвищити за рахунок одночасного збільшення температури теплоносія та вмісту його вологи. Так, при температурі теплоносія 370°C та вмісті вологи 140 г/кг с. пов, розрахункове значення температури матеріалу в першому періоді сушіння становить 70°C і практично збігається з експериментальними значеннями, отриманими при тих же параметрах теплоносія і швидкості його руху 2 м/с. Однак, внаслідок недостатньої швидкості перенесення вологи поглиблення зони випаровування настає при вологості матеріалу 6%. Подальше вискотемпературне сушіння до необхідного кінцевого вмісту вологи призводить до перегріву верхніх зневоднених шарів і деградації гіпсу. Останнього можна

уникнути лише при закінченні процесу сушіння теплоносієм, температура якого не перевищує  $65 - 70^{\circ}\text{C}$ . Це подовжить сушіння на  $20 - 25$  хв., тобто загальний час сушіння дорівнюватиме  $25 - 30$  хв.

За наявності ж повітропроникних оболонок у вигляді двох листів армуючого картону температура матеріалу підвищується до  $93^{\circ}\text{C}$ , що інтенсифікує перенесення вологи з глибини матеріалу до поверхні і дозволяє здійснити процес сушіння без поглиблення зони випаровування за  $9,5$  хв. Таким чином, при пародепресійному методі можна прискорити процес сушіння у  $2,5 - 3,0$  рази.

**Мета дослідження** – розглянути вплив паропроникної оболонки на інтенсифікацію внутрішнього масопереносу при сушінні катилірно-пористого колоїдного тіла – віскозного волокна.

**Матеріали та методи дослідження.** На рис.1. наведені дані щодо впливу повітропроникної оболонки на процес сушіння гіпсової пластини [6]. Скориставшись цими даними, оцінимо точність методики розрахунку температури матеріалу в першому періоді сушіння.



**Рис.1. Процес сушіння гіпсової пластини:**  
пунктирна лінія – без оболонки;  
суцільна лінія – за наявності оболонки;  
температури: 1 – на поверхні пластини; 2 – на глибині  $1/3$  товщини,  
3 – на глибині  $2/3$  товщини, 4 – температура мокрого термометра.

За швидкістю сушіння в першому періоді визначається тепловий попік, підведений до поверхні матеріалу, а за різницею температур теплоносія та поверхні картону визначено, що коефіцієнт тепловіддачі склав  $\alpha = 42 \text{ Вт}/(\text{м К})$ . За різницею температур поверхні картону і гіпсу був розрахований коефіцієнт теплопровідності картону, величина якого ( $\lambda = 0,18 \text{ Вт}/(\text{м К})$ ) добре узгоджується з даними, наведеними в довідковій літературі.

В результаті розрахунку отримано значення температури матеріалу під оболонкою  $93,0^\circ\text{C}$  при значенні коефіцієнта дифузійного опору картону  $\mu_d = 1,6$  та  $95,0^\circ\text{C}$  при  $\mu_d = 2,0$ . Таким чином, розраховані значення температури матеріалу задовільно узгоджуються з експериментально виміряною величиною ( $93,0^\circ$ ).

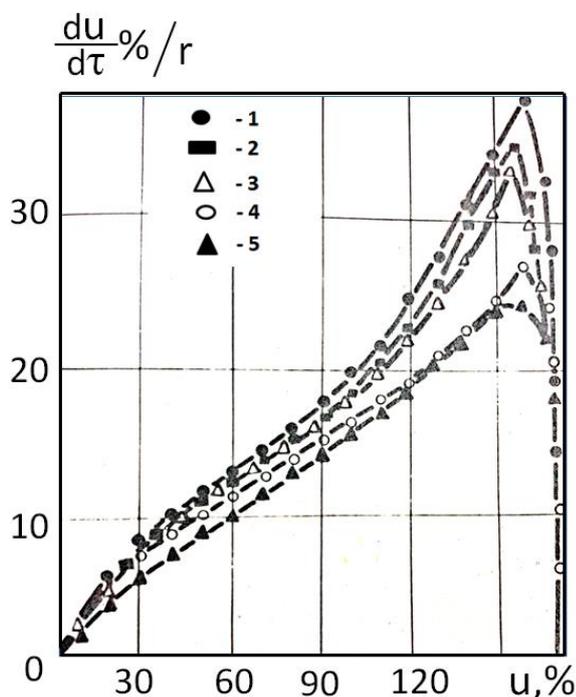
**Результати досліджень та їх обговорення.** В експериментальних дослідженнях були використані зазвичай застосовувані трикотажні оболонки та оболонки з підвищеною щільністю з двох бавовняних та однієї віскозної нитки, а також сукняні та паперові оболонки.

Експерименти проводилися на пакуваннях завтовшки 20 мм, висотою 90 мм і зовнішнім діаметром 0.17 м. при наступних параметрах теплоносія: температура  $120^\circ\text{C}$ , вміст вологи 80 г/кг с. пов. та швидкість руху 2,5 м/с. Криві швидкості сушіння віскозного шовку в оболонках представлені на рис. 2.

На початковій стадії в процесі прогріву швидкість сушіння зростає, досягає максимального значення, а потім безперервно знижується. Відсутність чітко вираженого періоду постійної швидкості сушіння свідчить про низьку інтенсивність перенесення в матеріалі, тобто. процес сушіння лімітується швидкістю внутрішнього масопереносу. Для зразка в одинарній трикотажній оболонці (крива 1) спостерігаються найбільші значення швидкості сушіння і величини другого критичного вмісту вологи ( $U_{кр2} = 86\%$ ), що характеризує початок поглиблення зони випаровування всередину матеріалу.

При проведенні процесу сушіння в паперовій оболонці інтенсивність випаровування залишається приблизно на тому ж рівні, що і для одинарної трикотажної оболонки, проте величина другого критичного вологовмісту

знижується до 60%. (крива 2), що свідчить про інтенсифікацію вологопереносу в матеріалі



**Рис.2. Криві швидкості сушіння віскозного шовку в коконах:**  
 (  $t = 120^{\circ}\text{C}$ ;  $d = 80$  г/кг с. пов.;  $v = 2,5$  м/с)  
 оболонки: 1 – одинарна трикотажна; 2 – паперова;  
 3 – щільна трикотажна; 4 – подвійна паперова; 5 – сукняна.

Дещо нижче розташовується крива 3 для зразка в щільній трикотажній оболонці. Дуже невелика ділянка першого періоду і найменша швидкість сушіння спостерігається при зневодненні волокна в сукняній оболонці (крива 5).

Значення товщини та дифузійного опору досліджуваних оболонок, визначені методом стаціонарного потоку вологи наведені у таблиці 1.

### 1.Характеристики паропроникних оболонок

Оболонка	$s \cdot 10^2$ , м	$\mu_d s \cdot 10^2$ , м	$\mu_d$
Одинарна трикотажна	0,7	2,8	4,0
Щільна	1,3	19,0	14,6
Сукняна	2,5	27,0	10,8
Паперова	0,1	23,6	236,0

Отримані експериментальні будуть використані для розробки методики визначення температури матеріалу при пародепресійному сушінні.

## **Висновки та перспективи**

Пародепресійний метод сушіння, розроблений науковцями ІТТФ НАН України, дозволяє прискорити внутрішній вологоперенос і створює, таким чином, передумови для інтенсифікації процесу сушіння.

Дані експериментів підтвердили низьку інтенсивність перенесення вологи в катилірно-пористому колоїдному тілі. Це свідчить про те, що саме швидкістю внутрішнього масопереносу лімітується процес сушіння таких тіл.

Показано, що найбільші значення швидкості сушіння спостерігаються при застосуванні одинарної трикотажної оболонки, але величина другого критичного вологовмісту знижується за наявності паперової оболонки, що свідчить про інтенсифікацію вологопереносу в матеріалі .

Отримані експериментальні результати можуть бути використані для розробки ефективних методів управління тепломасообмінними процесами в твердих дисперсних тілах.

## **Список використаних джерел**

1. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. - Вінниця: НТУ, 2007. - 76 с
2. Тертишний О.О., Півоваров О.А., Кошулько В.С. Гідромеханічні процеси та обладнання в харчових виробництвах: Навчальний посібник – Дніпро: ДДАЕУ, 2024. – 364 с.
3. Шеліманов В.О., Шеліманова О.В. Особливості сушіння матеріалів у продувному шарі: [Монографія]. – К.: КОМПРИНТ, 2017. – 116 с.
4. Шеліманова О.В., Ткаченко В.Р. Інтенсифікація внутрішнього тепломасопереносу при переробці сировини рослинного походження - Енергетика і автоматика – 2019 – № 5, с. 97-106.

5. Поверхнево-активні речовини [https://novohim.com.ua/povero-aktivnye-veshhestva-chto-eto-i-kakie-pav-byvayut-2/?srsltid=AfmBOopsULoXM6G7HCTl\\_NAcn9xw9ioVtyNu1tqFTSkwQDanXujrd2pS](https://novohim.com.ua/povero-aktivnye-veshhestva-chto-eto-i-kakie-pav-byvayut-2/?srsltid=AfmBOopsULoXM6G7HCTl_NAcn9xw9ioVtyNu1tqFTSkwQDanXujrd2pS)

6. Кремньов О.О., Пієвський І.М. Тепломасообмінні процеси у виробництві гіпсових та гіпсобетонних будівельних матеріалів.-К.: Наук. думка, 1989. - 189 с.

### References

1. Tkachenko S. Y., Spivak O. Yu. Sushlyni protsesy ta ustanovky. Navchalnyi posibnyk. - Vinnytsia: NTU, 2007. - 76 s

2. Tertyshnyi O.O., Pivovarov O.A., Koshulko V.S. Hidromekhanichni protsesy ta obladnannia v kharchovykh vyrobnytstvakh: Navchalnyi posibnyk – Dnipro: DDAEU, 2024. – 364 s.

3. Shelimanov V.O., Shelimanova O.V. Osoblyvosti sushinnia materialiv u produvnomu shari: [Monohrafiia]. – K.: KOMPRYNT, 2017. – 116 s.

4. Shelimanova O.V., Tkachenko V.R. Intensyfikatsiia vnutrishnoho teplomasoperenosa pry pererobtsi syrovyny roslynnoho pokhodzhennia - Enerhetyka i avtomatyka – 2019 – № 5, s. 97-106.

5. Poverkhnevo-aktyvni rehovyny [https://novohim.com.ua/povero-aktivnye-veshhestva-chto-eto-i-kakie-pav-byvayut-2/?srsltid=AfmBOopsULoXM6G7HCTl\\_NAcn9xw9ioVtyNu1tqFTSkwQDanXujrd2pS](https://novohim.com.ua/povero-aktivnye-veshhestva-chto-eto-i-kakie-pav-byvayut-2/?srsltid=AfmBOopsULoXM6G7HCTl_NAcn9xw9ioVtyNu1tqFTSkwQDanXujrd2pS)

6. Kremnov O.O., Piievskiy I.M. Teplomasoobminni protsesy u vyrobnytstvi hipsovykh ta hipsobetonnykh budivelnykh materialiv.-K.: Nauk. dumka, 1989. - 189 s.

EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER IN SOLID  
DISPERSED MATERIALS DURING VAPOR-DEPRESSION DRYING

A.G. KOLIENKO, O.V. SHELIMANOVA, D. Yu. Biletskyi

**Abstract.** *The intensity of technological processes involving dispersed materials is most often limited by the speed of internal mass transfer. The vapor-depression drying method, developed by scientists of the Institute of Thermal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, allows for the intensification of internal moisture transfer and thus creates the prerequisites for accelerating the drying process.*

*The vapor-depression drying process has been considered in detail in the literature for the case of drying a capillary-porous body - sheet plaster.*

*The purpose of this study is to consider the effect of a vapor-permeable shell on the intensification of internal mass transfer during the drying of a capillary-porous colloidal body - viscose fiber.*

*In experimental studies, ordinary knitted shells and shells with increased density, as well as cloth and paper shells were used. The absence of a clearly defined period of constant drying speed was recorded, which indicates a low intensity of moisture transfer in the material. The highest values of the drying speed are achieved when using a single knitted shell, the lowest - when dewatering the fiber in a cloth shell.*

*The obtained experimental data can be used to develop effective methods for controlling the drying processes of solid dispersed bodies.*

**Keywords:** *vapor-depression drying, solid dispersed bodies, vapor-permeable shell, drying rate*