

УДК 676.026.522

Марчевський Віктор Миколайович

*кандидат технічних наук,
професор кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Марчевский Виктор Николаевич

*кандидат технических наук,
професор кафедры машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Marchevsky Viktor

*Candidate of Technical Sciences, Professor
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*

Новохат Олег Анатолійович

*кандидат технічних наук
кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Новохат Олег Анатольевич

*кандидат технических наук
кафедра машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Novokhat Oleh

*Candidate of Technical Sciences
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*

Телестакова Вікторія Вікторівна

*магістр кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Телестакова Виктория Викторовна

*магістр кафедры машин и аппаратов химических и нефтеперерабатывающих производств
Национального технического университета Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Telestakova Viktoriia

*Master of the
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*

**КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ СУШІННЯ КАРТОНУ,
НАПОВНЕНОГО ЦЕОЛІТОМ**

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СУШКИ КАРТОНА,
НАПОЛНЕННОГО ЦЕОЛИТОМ**

KINETIC LAWS FOR DRYING CARTON FILLED WITH ZEOLITE

Анотація. Вперше розроблений метод отримання картону, наповненого цеолітом, обґрунтовано фізичну модель процесу сушіння, доопрацьована математична модель процесу сушіння картону, наповненого цеолітом, встановлено кінетичних закономірностей процесу сушіння картону, наповненого цеолітом, встановлені залежності вологовмісту від часу сушіння за різних теплових потоків, встановлені залежності вологовмісту від концентрації наповнювача.

Ключові слова: цеоліт, інфрачервоне випромінювання, дивергенція.

Аннотация. Впервые разработан метод получения картона, наполненного цеолитом, обоснованно физическую модель процесса сушки, доработана математическая модель процесса сушки картона, наполненного цеолитом, установлены кинетических закономерностей процесса сушки картона, наполненного цеолитом, установленные зависимости влагосодержания от времени сушки при различных тепловых потоках, установленные зависимости влагосодержания от концентрации наполнителя.

Ключевые слова: цеолит, инфракрасное излучение, дивергенция.

Summary. The method of obtaining a cardboard filled with zeolite was developed for the first time, the physical model of the drying process was substantiated, the mathematical model of the drying process of the zeolite filled cardboard was updated, the kinetic regularities of the drying process of the zeolite filled carton were established, the moisture content depended on the time of drying in different heat fluxes, concentration of the filler.

Key words: zeolite, infrared radiation, divergence.

Сучасний ринок потребує екологічно чистих пакувань, які забезпечують якість і значний термін зберігання продуктів. В даній роботі проведено дослідження сушіння нового виду картону, який збільшує термін зберігання харчових продуктів із забезпеченням їх якості [1].

Метою даної роботи є встановлення кінетичних закономірностей процесу сушіння картону, наповненого цеолітом. В якості джерела теплової енергії вибрано інфрачервоне (ІЧ) випромінювання.

Наукові роботи в подібному напрямку виконані канадськими вченими, які встановили, що перед зоною випаровування рухається зона конденсації [2–4]. Ця зона підвищує вологовміст картону до величини, яка перевищує його початковий середній вологовміст. На жаль, в цих роботах не досліджувався вплив наповнювачів на кінетичні закономірності процесу сушіння картону.

В роботах [5] стосовно сушіння флотингу також не враховувався вплив наповнювачів на кінетику процесу сушіння.

Робіт з дослідження картону, наповненого мінеральним капілярно-пористим наповнювачем — цеолітом, в літературних джерелах не виявлено, що зумовлює актуальність такого дослідження.

Фізична модель. Фізична модель радіаційного сушіння картону, наповненого цеолітом, включає такі процеси: випромінювання променевого потоку нагрітою поверхнею випромінювача; поглинання основної частини променевого потоку сірим тілом картону; втрати невеликої частини променевого потоку на віддзеркалення від поверхні картону та проходження наскрізь картону; виділення теплоти на поверхні та в об'ємі картону; нагрівання поверхні картону до температури мокрого термометра; випаровування поверхневої вологи та вологи великих капілярів; масовіддача пари від лицьової поверхні картону в навколишнє середовище і фільтрація пари

вглиб картону та його конденсація; випаровування води з мікрокапілярів і адсорбційно зв'язаної води та швидке нагрівання картону (другий період сушіння).

Математична модель. На основі аналізу фізичної моделі за основу математичної моделі обрано диференціальне рівняння теплопереносу з внутрішнім джерелом теплоти [6]:

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \varepsilon r \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + Q_v, \quad (1)$$

де c — масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ_0 — густина картону, кг/м³; Q_v — внутрішнє об'ємне джерело теплоти, створене поглинанням інфрачервоного випромінювання, Вт/м³; λ — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); ε — коефіцієнт фазового перетворення рідини в пару; r — питома

теплота пароутворення, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; T — абсолютна тем-

пература, К; $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ — швидкість сушіння, кг/(кг·с);

$\frac{\partial T}{\partial \tau}$ — швидкість нагрівання картону, К/с.

Прийнято, що розподілення теплового радіаційного потоку за товщиною картону описується рівнянням Ламберта-Бугера [5]:

$$q_r \Big|_z = q_r \Big|_{T_{z=0}} e^{-\int_0^z K dz}, \quad (2)$$

де z — координата за товщиною картону, м.

Дивергенція вектора променевого теплового потоку в об'ємі картону:

$$\frac{\partial q_r}{\partial z} = -q_r \Big|_{T_{z=0}} K e^{-Kz}. \quad (3)$$

Швидкість сушіння в першому періоді [6]:

$$-\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\beta}{g} (p_s - p_{nnc}) \Big|_{T_{z=0}}, \quad (4)$$

де β — коефіцієнт вологовіддачі, м/с; g — маса квадратного метру абсолютно сухого картону, кг/м²; p_n, p_n — тиск насиченої пари на поверхні шару картону та парціальний тиск водяної пари в прилеглому шарі оточуючого середовища (волого повітря) відповідно, Па.

В другому періоді швидкість сушіння залежить від різниці між поточним і рівноважним вологовмістами картону (u, u_p) [6]:

$$-\frac{du}{d\tau} = k(u - u_p) \quad (5)$$

де k — константа швидкості сушіння в другому періоді, с⁻¹; u, u_p — середній вологовміст в поточний момент часу і рівноважний у шарі картону, відповідно, кг/кг.

Наведені вище рівняння (1–5) дають можливість скласти робочу математичну модель процесу радіаційного сушіння картону, наповненого цеолітом:

$$\begin{cases} \frac{du}{d\tau} = \frac{\beta}{g} [p_n - p_n] + k(u - u_p) \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_r}{c_{p\,eff} \rho_{eff}} K e^{-Kz} - \frac{\rho_f r}{\rho_{eff} c_{p\,eff}} \frac{du}{d\tau} \end{cases} \quad (6)$$

де $c_{p\,eff}(T)$ — температурна залежність масової ізобарної теплоємності вологого картону з цеолітом, Дж/(кг·К); $\rho_{eff}(T)$ — температурна залежність ефективної густини вологого картону, кг/м³; $\rho_f(T)$ — температурна залежність густини абсолютно сухого картону, кг/м³; t — час, с; Z — декартова координата, м; $K(T(z))$ — температурна залежність «сірого» значення ефективного коефіцієнта поглинання вологого картону, м⁻¹; $\partial u / \partial \tau$ —

швидкість сушіння, с⁻¹ (кг/(кг·с)); $a_{eff} = \frac{\lambda_{eff}}{c_{p\,eff} \rho_{eff}}$ —

ефективна температуропровідність картону, м²/с.

Радіаційний потік q_r , що надходить на поверхню картону, визначається за законом Стефана-Больцмана [7]:

$$q_r \Big|_{T_z=0} = \varepsilon_{pr} (K_{a-v}) \sigma (T_{IR}^4 - T_{z=0}^4), \quad (7)$$

де $\varepsilon_{pr}(K_{a-v})$ — ступінь поглинутої енергії ІЧ випромінювання вологим повітрям; σ — стала Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); $T_{IR}, T_{z=0}$ — абсолютна температура поверхонь інфрачервоного випромінювача та картону, відповідно, К; ε_{pr} — ступінь поглинання енергії ІЧ випромінювання вологим картоном.

Система рівнянь (6) та рівняння (7) є нелінійними за теплофізичними властивостями та потоковими членами.

Початкові умови для (6), $\tau = 0$:

$$T = T \Big|_z = const, \quad 0 \leq z \leq \delta_f, \quad u = u(z) = const, \quad 0 \leq z \leq \delta_f \quad (8)$$

де δ_f — товщина вологого картону, м.

Граничні умови для (6), $\tau > 0$:

– на поверхні ІЧ випромінювача діють граничні умови першого роду

$$T_{IR} = T(W) = const, \quad (9)$$

де W — значення електричної потужності живлення радіаційного нагрівника, Вт. На цій границі також задається «сіре» значення ступеня чорноти робочої поверхні ІЧ випромінювача ε_{IR} ;

– на лицьовій стороні картону та на нижній задано граничні умови III роду:

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1 (T - T_{s_1}), \quad -\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2 (T - T_{s_2}), \quad (10)$$

де α_1, α_2 — коефіцієнт тепловіддачі з боку лицьової та нижньої сторін шару картону, відповідно, Вт/(м²·К); T_{s_1}, T_{s_2} — температура навколишнього середовища, що оточує шар картону з боку його лицьової та нижньої сторін, відповідно, К.

Система рівнянь (1)–(10) є повним математичним описанням нелінійної одновимірної задачі сушіння ІЧ випромінюванням вологого картону, наповненого цеолітом.

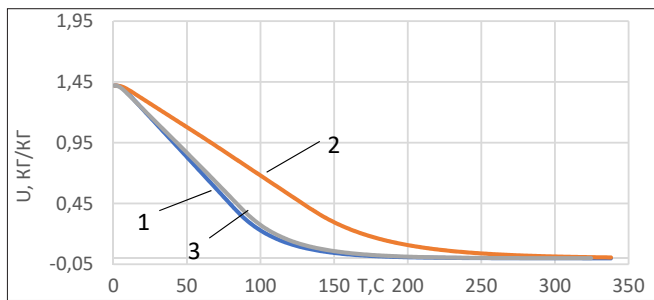
Числове розв’язання. Для числового розв’язання математичної моделі використано метод скінченних різниць (МСР). На основі цього методу розроблено програму для розрахунку.

За отриманими даними побудовано графічні залежності вологовмісту зразків картону, наповненого цеолітом, від часу сушіння, а також температури поверхні картону від часу сушіння, за різних теплових потоків $q_1 = 9313$ Вт/м²; $q_2 = 6372$ Вт/м²; $q_3 = 5032$ Вт/м² та різних вмістів цеоліту. Графічні залежності показано на рисунках 1 та 2.

Аналіз кривих сушіння рисунок 1 показує, що картон швидко нагрівається до початку першого періоду сушіння. Час прогріву продовжується до 3–5 с, температура зростає до 100 °С, а потім залишається сталою (рисунок 2).

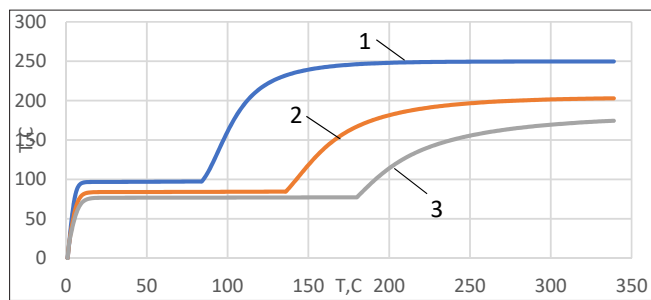
Перший період сушіння за різних теплових потоків протікає з постійною швидкістю за 20–50 с. Температура картону в першому періоді сушіння збільшується зі збільшенням густини променевого теплового потоку. Це пояснюється тим, що мінеральний наповнювач (цеоліт) використаний при формування даного картону, має достатньо розвинену поверхню, на якій утримується не зв’язана волога. З закінченням випаровування поверхневої вологи, температура починає стрімко зростати з постійною швидкістю, відбувається другий період сушіння. Початок другого періоду характеризується швидким зростанням температури зразка, з постійною швидкістю, що властиво за висушуванням вологи мікрокапілярів.

По закінченню проміжку постійної швидкості темп зростання температури сповільнюється по степеневому закону. В кінці процесу температурна крива займає горизонтальне положення. Температура



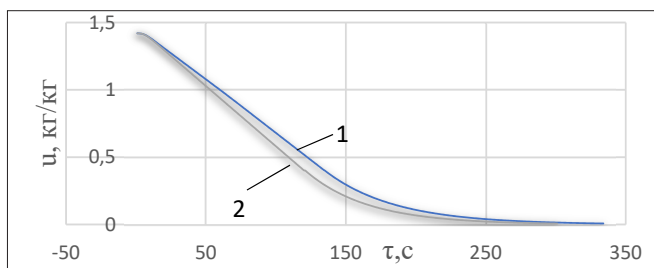
1 – $q = 9313 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q = 6372 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q = 5032 \text{ Вт/м}^2$

Рис. 1. Теоретична залежність вологовмісту від часу сушіння картону масою 200 г/м^2



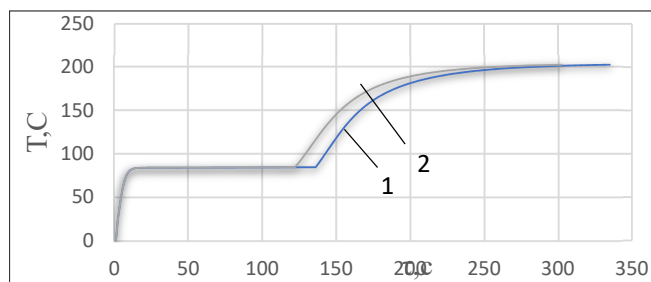
1 – $q = 9313 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q = 6372 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q = 5032 \text{ Вт/м}^2$

Рис. 2. Теоретична залежність температури від часу сушіння картону з масою 200 г/м^2



1 — з наповнювачем; 2 — без наповнювача

Рис. 3. Теоретична залежність вологовмісту від часу сушіння картону масою 200 г/м^2



1 — з наповнювачем; 2 — без наповнювача

Рис. 4. Теоретична залежність температури від часу сушіння картону масою 200 г/м^2

картону досягає значення за якого приток теплоти до зразка і відток зрівнюються.

Вплив вмісту цеоліту в картоні на кінетику сушіння показано на рисунку 3 і 4. З рисунка 3 видно, що добавка цеоліту зменшує швидкість сушіння. Зменшення швидкості починає наростати по ходу процесу в першому періоді сушіння, досягає максимуму на початку другого періоду сушіння. Далі по ходу процесу сушіння в другому періоді різниця швидкостей сушіння зменшується, але час сушіння

до рівнозначної кінцевої вологи більший у зразків картону, наповненого цеолітом.

З графічної залежності температури картону за часу сушіння видно, що наповнювач цеоліт подовжує перший період сушіння.

Висновок. За результатами розрахунку математичної моделі встановлені закономірності зміни вологовмісту та температури картону за сушіння при густині теплових потоків $q_1 = 9313 \text{ Вт/м}^2$; $q_2 = 6372 \text{ Вт/м}^2$; $q_3 = 5032 \text{ Вт/м}^2$ та вмісті наповнювача цеоліту 18 %.

Література

1. Марчевський В. М. / Картон з новим мінеральним наповнювачем/ Марчевський В. М., Телестакова В. В. // Науковий журнал «Молодий вчений» № 2 (54) лютий 2018.
2. Kuang H.-De Study of heat and mass transfer during IR drying of paper / H.-De Kuang, J. Thibault, B. P. A. Grandjean, R. Chen // *Drying Technology: An International Journal*. — 1994. — Vol. 12. — № 3. — P. 545–575.
3. Seyed-Yagoobi J. Drying of uncoated paper with gas-fired infrared emitters — optimum emitters' location within a paper machine drying section / J. Seyed-Yagoobi, H. Noboa // *Drying Technology: An International Journal*. — 2003. — Vol. 21. — № 10. — P. 1897–1908.
4. Seyed-Yagoobi J. Heating/drying of uncoated paper with gas-fired and electric infrared emitters — fundamental understanding / J. Seyed-Yagoobi, H. Noboa // *Drying 2004 — Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS) 2004*. — Vol. B. — P. 1217–1224.
5. Karvatskii A. Numerical modeling of physical fields in the process of drying of paper for corrugating by the infrared radiation / Karvatskii A., Marchevsky V., Novokhat O. // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. — Vol 2, No 5 (86). — 2017. — P. 14–22.
6. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. — М., Энергия, 1968. — 472 с.
7. Кулінченко В. Р. Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу) / В. Р. Кулінченко, С. Й. Ткаченко. — Київ: Фенікс, 2014. — 917 с.