

Література

1. Комплексная механизация льноводства / Болотов И.Н., Козырева А.А., Кондрашук П.К. [и др.]. – Л. – М.: Изд-во сельскохозяйственной литературы, 1962. – С. 155-158.
2. Василюк В.І. Про шляхи визначення деяких параметрів льноотеркових апаратів для обмолоту вороху / Василюк В.І. // Інноваційні напрямки в селекції, генетиці, технології вирощування, збирання, переробки і стандартизації технічних культур: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених – Суми: СОД, 2009. – С. 8-11
3. Льноуборочные машины / Г.А. Хайлис, Н.Н. Быков, В.Н. Бухаркин [и др.] – М. : Машиностроение, 1985. – С. 212-218.
4. Хайліс Г.А. Аналіз роботи чотирьохвальцевого льноотеркового апарату / Хайліс Г.А., Василюк В.І. // Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей. Вип. 16. – Луцьк: ЛДТУ, 2007. – С. 178-185.
5. Хайлис Г.А. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин / Хайлис Г.А. – Киев: УСХА, 1992. – С. 198-205.

*Рецензент д.т.н., проф. Г.А. Хайліс.*

УДК 674.05

© М.В. Вржеш, к.т.н., М.М. Толстушко, к.т.н., К.М. Луцик  
Луцький національний технічний університет

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ЕНТАЛЬПІЇ МЕМБРАНИ ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО ПРЕСА ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ**

*У статті наведено результати дослідження зміни ентальпії одиниці об'єму матеріалу мембрани облицювального преса при охолодженні протягом міжциклової технологічної перерви. Встановлено необхідність застосування теплоізоляційних систем з метою зменшення теплових втрат у технологічному процесі.*

**ПРЕС, МЕМБРАНА, ТЕМПЕРАТУРА, ЕНТАЛЬПІЯ,  
ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, ТЕПЛОЄМНІСТЬ, ТЕПЛОВІДДАЧА.**

**Постановка проблеми.** Сучасне меблеве виробництво у технологічних процесах облицювання фасадних елементів широко

застосовує мембранні преси. Енергетична складова собівартості кінцевої продукції досить вагома. Застосування енергоощадних технологій мембранного пресування може суттєво підвищити ефективність виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** свідчить про те, що в літературі мало уваги приділено дослідженню процесів теплообміну у мембранному пресі [1, 2, 3].

**Мета дослідження** – дослідити зміни ентальпії одиниці об'єму матеріалу мембрани облицювального преса при охолодженні протягом міжциклової технологічної перерви.

**Результати дослідження.** Розглянемо охолодження мембрани товщиною  $2\delta$  (рис. 1) з урахуванням граничних умов третього роду. Мембрана виготовлена з однорідного та ізотропного матеріалу з постійними теплофізичними характеристиками.

У початковий момент часу ( $\tau=0$ ) температура в мембрані розподілена рівномірно та дорівнює  $t_0$ . Мембрана розміщена в середовищі з постійною температурою  $t_c$ , причому  $t_c < t_0$ . Теплообмін на поверхнях мембрани відбувається при постійних коефіцієнтах тепловіддачі  $\alpha = const$ . При поставлених умовах розподіл температури по товщині мембрани повинен бути симетричним, тобто  $\partial t(0, \tau)/\partial x = 0$ .

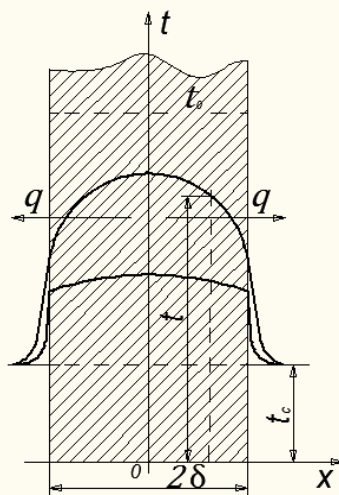


Рис. 1 – Розподіл температури у мембрані при нестационарній теплопровідності

Математичне формулювання задачі можна спростити, якщо ввести надлишкову температуру  $\theta = t - t_c$ . Тоді диференціальне співвідношення теплопровідності для мембрани можна записати у такому вигляді:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \delta^2}, \quad (1)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – тривалість процесу охолодження, с.

Початкові умови:

при  $\tau = 0$

$$\theta(x, 0) = \theta_0. \quad (2)$$

Граничні умови:

при  $x = \delta$

$$2\delta \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial \delta} \right)_{\delta=\delta} = -\frac{\alpha}{\lambda} \vartheta_{\delta=\delta}, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу мембрани.

Умова симетрії:

при  $x = 0$

$$\left( \frac{\partial \vartheta}{\partial \delta} \right)_{\delta=0} = 0. \quad (4)$$

Спочатку визначено функцію  $\theta(x, \tau)$  розподілу температури у мембрані у довільний момент часу процесу охолодження, використовуючи достатньо універсальний метод розділення змінних, що докладно висвітлений в літературному джерелі [4]. Зазначений метод дозволяє одержати сукупність частинних розв'язків  $\theta_n$ , які задовольняють диференціальне рівняння теплопровідності та граничні умови. Сума частинних розв'язків утворює загальний розв'язок рівняння теплопровідності:

$$\vartheta(\delta, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \tilde{N}_i \cos\left(\mu_i \frac{\delta}{\delta}\right) \tilde{a}^{-\mu_i^2 Fo}, \quad (5)$$

де  $Fo$  – критерій Фур'є, причому

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}. \quad (6)$$

Кожне значення кореня  $\mu_n$  у формулі (5) відповідає частинному розподілу температури та залежить від критерію Біо (Bi), де

$$Bi = \frac{a \cdot \delta}{\lambda}. \quad (7)$$

Значення константи  $C_n$  визначається з початкових умов з врахуванням критерію Фур'є ( $Fo$ ).

При  $Fo=0$  ( $\mu = 0$ ), отримаємо:

$$\vartheta_0 = \vartheta(\delta, 0) = \sum_{i=1}^{\infty} \tilde{N}_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right). \quad (8)$$

Скористаємося властивістю ортогональності тригонометричної функції. Для цього розв'язок (8) помножимо на  $\cos(\mu_n \delta)$  і проінтегруємо в межах  $-\delta \leq \delta \leq \delta$ :

$$\vartheta_0 \int_{-\delta}^{\delta} \cos(\mu_n x) dx = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \int_{-\delta}^{\delta} \cos(\mu_n x) \cos(\mu_n x) dx. \quad (9)$$

Після перетворень, з врахуванням  $m=n$ , одержимо:

$$C_n = \frac{\vartheta_0 \int_{-\delta}^{\delta} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) dx}{\int_{-\delta}^{\delta} \cos^2\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) dx} = \frac{\vartheta_0 \frac{2\delta}{\mu_n} \sin \mu_n}{\delta \left(1 + \frac{\sin 2\mu_n}{2\mu_n}\right)} = \vartheta_0 \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}. \quad (10)$$

Підставивши значення  $C_n$  у розв'язок (5), отримаємо кінцевий результат для симетрично охолоджуваної мембрани:

$$\vartheta = \sum_{n=1}^{\infty} \vartheta_0 \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) e^{-\mu_n^2 \tau / \delta^2}, \quad (11)$$

або в безрозмірній формі

$$\theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \frac{t(x, \tau) - t_{\bar{n}}}{t_0 - t_{\bar{n}}} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (12)$$

де  $A_n = 2 \sin \mu_n / (\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n)$ .

Так як  $\cos(\mu_n x / \delta)$  – величина обмежена, а  $\exp(-\mu_n^2 Fo)$  – величина, що швидко зменшується, то, як показує аналіз рівняння (12), при  $Fo \geq 0,25$  ряд стає збіжним і може бути замінений достатньо точно першим членом [4].

У цьому випадку розподіл температури у мембрані можна отримати із рівняння:

$$\theta = A_1 \cos\left(\mu_1 \frac{x}{\delta}\right) \exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (13)$$

При заданих координатах  $x$  невідома температура  $\theta$  є функцією тільки критеріїв  $Bi$  і  $Fo$ :

$$\theta = f(Bi, Fo). \quad (14)$$

При  $Bi \rightarrow \infty$  температура поверхні мембрани наближається до температури охолоджуючого середовища, а граничні умови третього роду переходять в граничні умови першого роду. Розрахунки показують, що таку властивість має поле при  $Bi \geq 100$ .

При  $Bi \rightarrow 0$ , коли внутрішній термічний опір достатньо малий у порівнянні з термічним опором на поверхні, температура по товщині мембрани розподіляється рівномірно.

Визначення теплових втрат при охолодженні мембрани виконувалось у такій послідовності [4]. Визначено зміну ентальпії одиниці об'єму матеріалу стінки мембрани за довільний проміжок часу

$$Q = c_\delta \rho (\vartheta_0 - \bar{\vartheta}), \quad (15)$$

де  $c_\delta$ ,  $\rho$  – відповідно ізобарна теплоємність та щільність матеріалу мембрани.

Температура  $\bar{\vartheta}$  у середній площині мембрани, розраховуємо за формулою:

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta \vartheta(x, \tau) dx. \quad (16)$$

Підставивши у формулу (16) значення  $\theta$  з рівняння (12), одержимо

$$\begin{aligned} \bar{\vartheta} &= \frac{\vartheta_0}{\delta} \int_0^\delta \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \exp(-\mu_n^2 Fo) dx = \\ &= \frac{\vartheta_0}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 Fo) \int_0^\delta \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) dx = \\ &= \frac{\vartheta_0}{\delta} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 Fo) \frac{\delta \sin \mu_n}{\mu_n} = \vartheta_0 \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 Fo) \end{aligned} \quad (17)$$

Середня відносна температура мембрани

$$\bar{\theta} = \frac{\bar{\vartheta}}{\vartheta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (18)$$

де

$$B_n = A_n \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} = \frac{2Bi}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)}. \quad (19)$$

Як видно із рівняння (18), величина  $\bar{\theta}$  залежить лише від чисел  $Fo$  і  $Bi$ . Ряд (18) швидко стає збіжним і при  $Fo \geq 0,25$  можна обмежитися першим членом ряду

$$\bar{\theta} = B_1 e^{-\mu_1^2 Fo}, \quad (20)$$

де

$$B_1 = \frac{2Bi}{\mu_1 (Bi^2 + Bi + \mu_1^2)}. \quad (21)$$

Підставивши у формулу (15) значення  $\theta_0$  та  $\bar{\vartheta}$ , одержимо:

$$Q = c\rho(t_0 - t_c) \left( 1 - \frac{\bar{\vartheta}}{\vartheta_0} \right) = c\rho(t_0 - t_c) (1 - \bar{\theta}) \quad (22)$$

У межах числового експерименту було досліджено процес охолодження мембрани від найбільшого технологічного значення температури ( $t = 99^\circ\text{C}$ ) до температури середовища ( $t_c = 20^\circ\text{C}$ ), причому критерій Фур'є був змінним, а критерій Біо фіксованим. Теплофізичні характеристики мембрани та параметри теплообміну на її поверхні подані у таблиці 1.

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики мембрани та процесу теплообміну

№	Параметр	Характеристика (кількісна або якісна)
1	Матеріал мембрани	Силікон
2	Товщина $\delta$ , мм	2,85
3	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м К)	0,14
4	Ізобарна теплоємність $C_p$ , Дж / (кг К)	1400
5	Щільність $\rho$ , кг / м <sup>3</sup>	1200
6	Коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь $\alpha$ , Вт / (м <sup>2</sup> К)	15

7	Початкова температура $t_0$ , °C	99
8	Температура середовища $t_c$ °C	20

Визначено температуру поверхні мембрани у градусах Цельсія, результати розрахунків подано у вигляді графічної залежності (рис. 2).

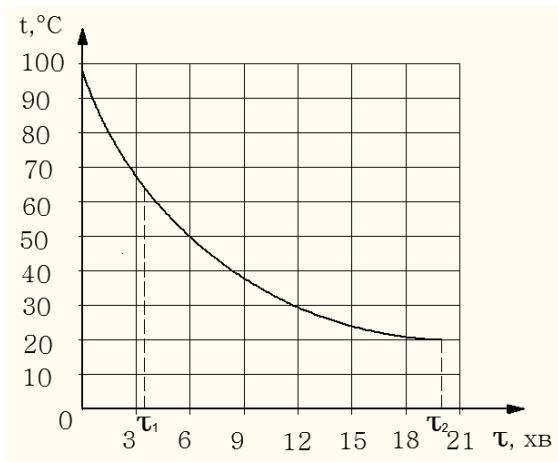


Рис. 2 – Графік процесу охолодження поверхні мембрани:  $\tau_1$  – час міжциклової технологічної перерви;  $\tau_2$  – час охолодження до температури середовища

Аналізуючи графік процесу охолодження мембрани (рис. 1) можна зробити такі висновки: по-перше, тривалість процесу охолодження до температури середовища складає  $\tau_2=20$  хв.; по-друге, тривалість міжциклової технологічної перерви складає  $\tau_1=3,2$  хв. до температури 64 °C.

Досліджено зміну ентальпії одиниці об'єму матеріалу мембрани від температури середовища. Результати розрахунків подано у вигляді графічної залежності (рис. 3).

**Висновки.** Протягом міжциклової технологічної перерви відбувається пониження температури зовнішньої поверхні мембрани на третину від початкового значення. Якщо охолодження мембрани триватиме більше 20 хвилин, то температура зазначеної поверхні дорівнюватиме температурі середовища. Таким чином, до початку наступного технологічного циклу мембрана потребуватиме додаткової кількості теплової енергії на підігрівання. Зменшення теплових втрат можна досягнути шляхом використання теплоізоляційних систем у камері пресування.

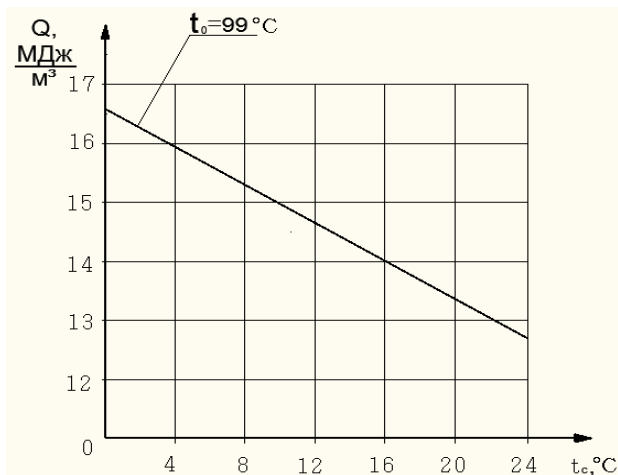


Рис. 3 – Графік функції  $Q = f(t_c)$

#### Література

1. Методика визначення розподілу температури за товщиною пакета шарів при облицюванні деревостружкових плит / М.В. Вржещ, О.Є. Кравчук // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 20. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2010. – С. 29 – 33.
2. Вржещ М.В., Забронець І.П. Процеси теплообміну у камері пресування мембранного преса // Студентський науковий вісник. Серія “Технічні науки”: Науковий збірник. – Випуск 3. – Частина 1. – Луцьк: Навчально-науковий відділ ЛНТУ, 2011. – С. 221-226.
3. Шостак В.В. Теорія і конструкції деревообробного устаткування / Шостак В.В., Савчук Я.І., Савич М.М.: Конспект лекцій. – Львів: НЛТУ України, 2009. – 376 с.
4. Четкин А.В., Занемонец Н.А. Теплотехника: Учеб. для хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 344 с.

Рецензент д.т.н., проф. М.П. Ярошевич