

Випромінювання атмосфери для діапазону хвиль, де вона поглинає сонячне випромінювання, апроксимується кривою абсолютно чорного тіла при температурі 200 К. Інтегральна густина випромінювання системи "Земля – атмосфера" в космосі дорівнює 200 Вт/м².

Ландшафт Землі, тобто наземні утворення, також характеризуються випромінюванням і відбивальними властивостями. Коефіцієнт відбивання в безпосередній близькості до Землі і на невеликих висотах визначається, в першу чергу, характером поверхні, а також хмарності. Значення інтегральних коефіцієнтів випромінювання змінюється в межах 0.85...0.97 мкм. В інженерній практиці характер власного випромінювання земного покриття вважають дифузним і приймають, що земна поверхня випромінює як сіре тіло з коефіцієнтом випромінювання, рівним 0.35 у видимій області спектра і 0.90 – в інфрачервоній. Для довжин хвиль більше 4 мкм випромінювання ґрунту і рослинності приймають рівним випромінюванню абсолютно чорного тіла при тій же температурі.

При проходженні сонячного випромінювання через атмосферу частина його енергії розсіюється і поглинається атмосферою. Саме проходження характеризується такими явищами:

- поглинанням і розсіюванням прямої сонячної радіації молекулами сухого повітря;
- поглинанням і розсіюванням пилу, що є в атмосфері;
- вибірконим (селективним) поглинанням молекулами водяної пари, вуглекислого газу, озону, окису вуглецю;
- відбиттям і поглинанням сонячного випромінювання шарами хмар.

Можливість використання сонячної енергії для промислових потреб, зокрема сушіння пиломатеріалів, залежить значною мірою, від географічної широти, пори року і погоди, тобто радіаційного (теплого) балансу окремо взятої території. Основною характеристикою концентрації вологи в атмосфері є так звана приведена товщина шару осадженої води на кілометр траси W_0' (см/км), що визначається за формулою:

$$W_0' = \rho_n \cdot \phi / \rho, \quad (1)$$

де ρ_n – абсолютна вологість насиченої пари; ϕ – відносна вологість насиченої пари; ρ – густина рідкої води.

Для передбачення величини сонячної інсоляції, тобто сонячного випромінювання, яке отримує горизонтальна поверхня Землі, використовують сонячні карти, на яких нанесені лінії постійного середньодобового повного випромінювання протягом заданого місяця на території України.

Прозорість атмосфери є також важливим фактором, який визначає надходження енергії сонячного випромінювання на об'єкт опромінення (об'єкт сушіння). Дослідженню інтегральної прозорості атмосфери на території України присвячені роботи М. І. Гойси, Г. Ф. Приходько, Л. З. Проха, Л. І. Сакалі, М. І. Щербаня, Л. С. Березіної, К. І. Пилипенко, К. С. Шифріна та інших. Узагальнення результатів цих та інших досліджень буде подано в наступних наших роботах.

Таким чином, знання властивостей сонячного випромінювання дозволяє нам успішно проектувати системи перетворення сонячної енергії в тепло-ву (геліотермічних колекторів) із подальшим їх використанням для сушіння деревини в геліосушарках.

Література

1. Озарків І. М. Використання сонячного випромінювання як нетрадиційного джерела енергії в камерному сушінні деревини// Доповіді 2-ї міжнар. наук-практ. конф. – Львів, 1997. – С. 140–141.
2. Мак-Вейч Д. Применение солнечной энергии. – М.: Энергоиздат, 1981 – 216 с.
3. Зюев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. – М.: Сов. радио, 1970. – 496 с.

УДК 647.047

Доц. І.М. Озарків, канд. техн. наук – УкрДЛТУ

УЗАГАЛЬНЕНИЙ КРИТЕРИАЛЬНЫЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЧАСУ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ТОНКИХ ПИЛО- І ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Наводяться рівняння, отримані на основі сучасної теорії сушіння тіл.

Doc. I.M. Ozarkiv – USUFWT

The general kriterial method of time of thin lumber and sheet shaped materials

Equations, obtained on the present day theory of drying have been presented.

У сучасній спеціальній технічній літературі пропонуються різні методи визначення тривалості сушіння для різних матеріалів з деревини. При цьому, деякі з них базуються на експериментальних даних, а тому носять частіше емпіричний характер і можуть лише використовуватися для умов, при яких були вони отримані.

Необхідно зазначити, що для отримання формул тривалості сушіння використовують теорію тепломасообміну та тепломасопереносу, закони термодинаміки незворотних процесів і т. п.

Розв'язок таких задач навіть для відносно простих формул тіла (необмеженої пластини, необмеженого циліндра, кулі) створює значні математичні труднощі, а самі формули мають дуже складний характер, які практично неможливо використовувати для технічних цілей у виробничих умовах [1, 2]. Тому, щоб використати ці формули, в них вносять різні допущення і спрощення, в зв'язку з чим запропоновані формули розрахунку тривалості сушіння деревини є приблизними і з певною точністю описують характер фактичної кривої сушіння.

Реальні тіла (чорнові мебелі заготовки, тарна дощечка, лущений та струганий шпону), що піддаються сушінню, мають форму, згідно з якою перенесення тепла і маси (вологи) відбувається в трьох напрямках. Тому, диференціальне рівняння перенесення вологи для тривимірної пластини має вигляд:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau}(x, y, z) = a_m' \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

а крайові умови для конвективного підведення теплоти при умові початкового рівномірного розподілу початкового вологовмісту в досліджуваному матеріалі ($\tau = 0; U_{(x,y,z)} = U_n = \text{const}$) для поверхні матеріалу в напрямку x (індекс 1) опишуться таким рівнянням:

$$\alpha_{\text{up}}' \rho_0 [U_{(\pm R_1, y, z; \tau)} - U_p] = \pm a_m' \rho_0 \frac{\partial U}{\partial x(\pm R_1, y, z; \tau)}, \quad (2)$$

де a_m' – потенціал вологоперенесення; α_m' – коефіцієнт вологообміну, який чисельно дорівнює інтенсивності вологообміну при різниці концентрацій вологи між поверхнею тіла і оточуючого середовища; R_1 – визначальний розмір тіла, який дорівнює половині товщини матеріалу; U_p – рівноважний вологовміст.

Аналогічно можна записати і для двох інших напрямів.

Розв'язання даної задачі для значення локального вологовмісту в безрозмірному вигляді буде таким [1]:

$$E = E_1 \cdot E_2 \cdot E_3 = \frac{U_{(x,y,z)} - U_p}{U_{\kappa} - U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_{n_1} A_{m_2} A_{k_3} \times \cos \mu_{n_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{m_2} \frac{y}{R_2} \cos \mu_{k_3} \frac{z}{R_3} \exp \left[-(\mu_{n_1}^2 F_{o_1}' + \mu_{m_2}^2 F_{o_2}' + \mu_{k_3}^2 F_{o_3}') \right], \quad (3)$$

де A – постійні числа; μ_n – характерні числа або корені тригонометричного рівняння; F_o' – масообмінний критерій Фур'є.

Величина A_n визначається за такою формулою:

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}, \quad (4)$$

а корені μ_n знаходяться за виразом:

$$\text{ctg} \mu_n = \frac{1}{HR} \mu_n = \frac{1}{B_i} \mu_n. \quad (5)$$

В свою чергу, μ_n визначається із рівняння (5) графічним способом, а перші два значення μ_n і A_n наведені в табл. 1

Табл. 1. Значення μ_1, μ_2, A_1, A_2 для різних значень критерію HR

HR	μ_1	μ_2	A_1	A_2
	1,5708	4,7124	0,8106	0,09006
1	2	3	4	5
11,43005	1,4451	4,3488	0,8679	0,08582
5,67128	1,3390	4,0879	0,9049	0,07057
3,73205	1,22481	3,9044	0,9305	0,05553
2,74748	1,1686	3,7712	0,9480	0,03924
2,14451	1,0977	3,6704	0,9504	0,03377
1,73205	1,0330	3,5910	0,9695	0,02639
1,42815	0,9728	3,5264	0,9766	0,02063

1	2	3	4	5
1,19175	0,9157	3,4722	0,9817	0,01606
1,00000	0,8603	3,4256	0,9862	0,01241
0,83910	0,8057	3,3846	0,9896	0,00964
0,70021	0,7506	3,3478	0,9924	0,00706
0,57735	0,6939	3,3141	0,9945	0,00510
0,46631	0,6341	3,2827	0,9959	0,00352
0,36397	0,5790	3,2530	0,9972	0,00226
0,26795	0,4956	3,2245	0,9980	0,00129
0,17633	0,4079	3,1968	0,9988	0,00058
0,08749	0,2915	3,1692	0,9950	0,00015
0,00000	0,0000	3,1416	1,0000	0,00000

Середній вологовміст тривимірної пластини визначається рівнянням такого вигляду:

$$U_{(\tau)} = \frac{1}{R_1 R_2 R_3} \int_0^{R_1} \int_0^{R_2} \int_0^{R_3} U_{(x,y,z;\tau)} dx dy dz. \quad (6)$$

Підставивши в рівняння (3) значення вологовмісту $U_{(x,y,z;\tau)}$, отримаємо таке рівняння:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_{n_1} B_{m_2} B_{k_3} \exp \left[-(\mu_{n_1}^2 F_{o_1}' + \mu_{m_2}^2 F_{o_2}' + \mu_{k_3}^2 F_{o_3}') \right]. \quad (7)$$

Якщо обмежитися розглядом розв'язання для першого члена ряду, то можна записати:

$$\bar{E}_{\text{зар}} = E_1 \cdot E_2 \cdot E_3 = \frac{U - U_p}{U_{\kappa} - U_p} B_{1-1} B_{1-2} B_{1-3} \exp \left[\left(\mu_{1-1}^2 \frac{a_1' \tau}{R_1^2} + \mu_{1-2}^2 \frac{a_2' \tau}{R_2^2} + \mu_{1-3}^2 \frac{a_3' \tau}{R_3^2} \right) \right], \quad (8)$$

де $B_{1-1}, B_{1-2}, B_{1-3}, \mu_{1-1}, \mu_{1-2}, \mu_{1-3}$ – відповідно середні по перетину пластини амплітуди і корені характеристичного рівняння, які записані для першого члена ряду в кожному із трьох напрямів, тобто 1, 2, 3.

Значення амплітуди B_{n_i} визначається

$$B_n = \frac{A_n \sin \mu}{\mu_n}, \quad (9)$$

а корені μ_{1-n} можна знайти з такого виразу:

$$\mu_1^2 = \frac{1}{\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{B_{1m}'}} \quad (10)$$

де B_{1m}' – масштабний критерій Біо.

Рівняння (8) може бути безпосередньо використаним для розрахунку поточного вологовмісту тривимірного тіла в той чи інший момент часу при заданих коефіцієнтах вологопровідності a_m' , які є різними для деревини в різних напрямках.

Залежність часу $\tau(x, y, z, \tau)$ від початку сушіння ($U_n = \text{const}; \tau = 0$) до моменту, коли наступить регулярний режим сушіння ($F'_0 > F_{01}$) буде мати такий вигляд:

$$\tau(x, y, z, \tau) = \frac{R_1^2 R_2^2 R_3^2}{\mu_{1-1}^2 a_1' R_2^2 R_3^2 + \mu_{1-2}^2 a_2' R_1^2 R_3^2 + \mu_{3-1}^2 a_3' R_1^2 R_2^2} \cdot \ln \frac{B_{1-1} B_{1-2} B_{1-3}}{\bar{E}_{\text{заг}}}. \quad (11)$$

У випадку двовимірної пластини вираз (11) спрощується, тобто

$$\tau(x, y) = \frac{R_1^2 R_2^2}{\mu_{1-1}^2 a_1' R_2^2 + \mu_{1-2}^2 a_2' R_1^2} \ln \frac{B_{1-1} B_{1-2}}{\bar{E}_{\text{заг}}}. \quad (12)$$

Якщо у формулу (12) підставити значення S_1 в см, a_m' в $\text{см}^2/\text{с}$ і замінити натуральний логарифм на десятковий, то отримаємо вираз такого вигляду:

$$\tau = \frac{1,6 \cdot 10^2 \cdot S_1^2 S_2^2}{\mu_{1-1}^2 a_1' S_2^2 \cdot 10^6 + \mu_{1-2}^2 a_2' S_1^2 \cdot 10^6} \ln B_{1-1} B_{1-2} \left(\frac{U_n - U_p}{U_k - U_p} \right). \quad (13)$$

Значення B_{1m}' і μ_i можна знайти з допомогою відповідних таблиць, формул або номограм [1], що не створює будь-яких труднощів. Проте необхідно пам'ятати, що формули (11)–(13) можуть бути використані для опису процесу сушіння від його початку до моменту настання стадії регулярного режиму сушіння.

Проте, в практичних розрахунках іноді зручно звести розв'язання багатомірного тіла до тіла у вигляді необмеженої пластини. При цьому тут можливі два варіанти. У першому випадку двовимірне тіло з розмірами $R_1 \times R_2$ порівнюється з необмеженою пластиною розміром R_1 (рис. 1, а).

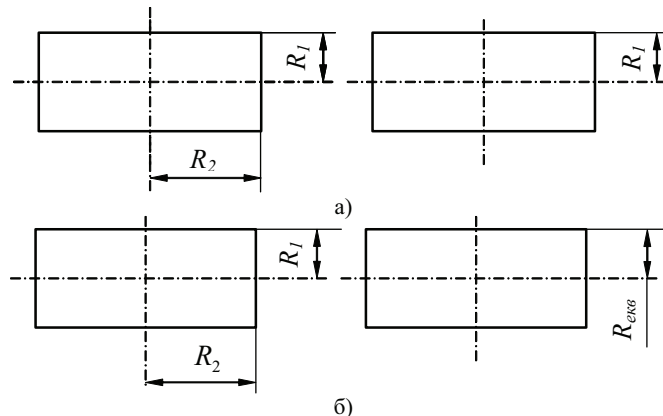


Рис. 1. Порівняння процесу сушіння тіла у вигляді необмеженої пластини з двовимірним тілом

При всиханні в будь-який момент часу сушіння необмежена пластина буде мати більший вологовміст, ніж двовимірне тіло. Це значить, що для необмеженої пластини необхідно буде більше часу ($\tau_{x,y} < \tau_{\text{необм}}$) тому, що були

взяті рівні розміри в напрямку 1 ($R_{x,y} = R_{\text{необм}}$). Це вимагає внесення поправочного коефіцієнта на час сушіння, тобто

$$C_\tau = \frac{\tau_{x,y}}{\tau_{\text{необм}}} < 1. \quad (14)$$

Інакше кажучи, можна записати

$$\tau_{\text{необм}} = \frac{R_1^2}{\mu_{1-1}^2 a_1'} \ln \frac{B}{E}. \quad (15)$$

Таким чином, вираз для знаходження C_τ для двовимірної пластини

$$C_\tau = \frac{\tau_{x,y}}{\tau_{\text{необм}}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{1-2}}{\mu_1} \right)^2 \cdot \frac{a_2'}{a_1'} \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2} \frac{\lg \frac{B_1 \cdot B_2}{E}}{\lg \frac{B_1}{E}}. \quad (16)$$

Це значить, що за даною формулою можуть бути побудовані номограми, як це зроблено Т.С. Шубінін [2] для $B_{1m}' \rightarrow \infty$, і які можуть бути використаними для розрахунку часу сушіння.

У другому випадку двовимірна пластина розмірами $R_1 \times R_2$ порівнюється з необмеженою пластиною, середній вологовміст якої в кожний момент процесу сушіння дорівнює середньому вологовмісту двовимірної пластини, тобто $\tau_{x,y} < \tau_{\text{необм}}$, коли $E_{\text{заг}} = E_{\text{екв}}$.

В даному випадку еквівалентна двовимірному тілу необмежена пластина буде мати розмір в напрямку 1, і дорівнювати $R_{\text{екв}}$ ($R_{\text{екв}} < R_1$).

Використовуючи принципи про зв'язок між загальним розв'язанням багатомірної задачі і розв'язанням в кожному з напрямків, можна для члена ряду записати такий вираз:

$$E_{\text{заг}} = E_1 \cdot E_2 = B_{1-1} \cdot B_{1-2} \cdot \exp \left[- \left(\mu_{1-1}^2 \cdot F'_{01} + \mu_{1-2}^2 \cdot F'_{02} \right) \right] = B_{\text{екв}} \cdot \exp \left[- \mu_{1\text{екв}}^2 \cdot F'_{0\text{екв}} \right]. \quad (17)$$

В даному випадку з правої сторони поставлено вираз для еквівалентного одномірного тіла, коли $R_1 = R_{\text{екв}}$.

На основі рівняння (17) для умов, коли $\tau_{x,y} = \tau_{\text{необм}}$, $a_1' = a_2' = a_{\text{екв}}'$, отримаємо:

$$\frac{1}{R_{\text{екв}}^2} \left(\mu_{1\text{екв}}^2 - \frac{\ln B_{1\text{екв}}}{F'_{0\text{екв}}} \right) \cdot \frac{\mu_{1-1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{1-2}^2}{R_2^2} - \ln \frac{B_{1-1} \cdot B_{1-2}}{F'_{01} \cdot R_1^2}. \quad (18)$$

З останнього виразу видно, що для того, щоб задовольнити умову еквівалентності, величина $R_{\text{екв}}$ повинна бути змінною в часі. Крім того, з рівняння (18) важко знайти величину $R_{\text{екв}}$, коли є невідомим час сушіння.

Для окремого випадку, коли $B_{1m}' \rightarrow \infty$ з рівняння (18) отримаємо при умові $B_{1-1} = B_{1-2} = B_{1\text{екв}}$ і $\mu_{1-1} = \mu_{1-2} = \mu_{1\text{екв}}$ таке рівняння:

$$R_{\text{екв}}^2 = \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_1^2 + R_2^2 + 0,084 \cdot \frac{R_2^2}{F_{01}}} \quad (19)$$

З останнього рівняння видно, що при розрахунку часу сушіння еквівалентний радіус дорівнює приведеному, тобто

$$S_{\text{пр}} = \frac{S_1 \cdot S_2}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}, \quad (20)$$

лише при $F_{01} \rightarrow \infty$ і займає проміжне значення між поправками, які вносяться величинами гідравлічного радіусу

$$S_{\Gamma} = \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1 + S_2}, \quad (21)$$

та приведенного.

Таким чином, визначення часу сушіння багатомірних тіл може бути заміненим рівнянням часу необмеженої пластини, але в цьому випадку реальні розміри тіла необхідно замінити на еквівалентний радіус $R_{\text{екв}}$ або необхідно врахувати коефіцієнтом на багатомірність тіла C_{Γ} . Варіант з використанням коефіцієнта C_{Γ} є більш простим, оскільки він вводиться в рівняння часу без врахування розмірів тіла. Проте, другий варіант показує, що можна використати теоретичне рівняння часу без введення будь-яких коефіцієнтів, а достатньо використати еквівалентний радіус $R_{\text{екв}}$. Крім того, останній показує на доцільність вибору приведенного або гідравлічного радіуса в розрахунковій формулі часу. Інакше кажучи, переваги в цьому випадку на стороні приведенного радіуса, тобто

$$R_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_1^2 + R_2^2}} \quad (22)$$

Література

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336 с.

УДК 66.047 **Инж. О.В. Станіславчук; проф. Я.М. Ханік, д-р техн. наук; ст. викл. Л.З. Білецька, канд. техн. наук; ст. викл. В.П. Дулеба, канд. техн. наук – НУ "Львівська політехніка"**

СУШІННЯ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ ПАСТОПОДІБНИХ МАТЕРІАЛІВ

Наведено результати досліджень сушіння хлібопекарських дріжджів фільтраційним методом сушіння суцільного шару матеріалу, із створенням у ньому штучної пористості та комбінованим фільтраційно-контактним методом.

Eng. O.V. Stanislavchuk, Prof. Ya.M. Hanyk, L.Z. Bilec'ka, V.P. Duleba – NU "Lvivs'ka politekhnik"

Drying of biological active paste materials

In entry presentation the result investigation drying yeast of filtration method of drying unbroken layer material, broken material and combination filtration-contact method.

Дуже важливим чинником для життєдіяльності дріжджів, як і для кожного живого організму, є вода. Однак висока вологість цього продукту сприяє його автолізу, порідненню та загниванню. Тому проблема зберігання пресованих дріжджів існує і сьогодні. Для створення необхідних умов зберігання цього продукту (температура 0-4 °С, відносна вологість повітря 82-96 %) сховища та транспортні засоби обладнують холодильними камерами. Але і за найкращих умов зберігання якісні показники дріжджів погіршуються вже через десять днів. Тому виробництво сухих дріжджів має важливе значення для харчової промисловості.

Сухі пекарські дріжджі можуть зберігатись при кімнатній температурі протягом шести місяців без значної втрати життєздатності та без руйнування їх гнилісними бактеріями.

Для сушіння дріжджів застосовується переважно конвективний метод сушіння. Ми досліджуємо доцільність використання фільтраційного методу для сушіння такого біологічно активного пастоподібного матеріалу як дріжджі. Вологий шар пастоподібного матеріалу має великий гідравлічний опір, тому для забезпечення відповідної швидкості профільовування теплоносія через шар матеріалу необхідно створювати значні перепади тиску, що негативно впливає на якість готового продукту – це призводить до зростання кількості мертвих клітин. Підведення значної кількості теплоти до матеріалу при малих швидкостях фільтрування вимагає збільшення температури теплоносія, що є неприпустимим для сушіння такого термолабільного матеріалу. Застосування теплоносія з низькою температурою для даного способу сушіння значно збільшує тривалість процесу.

Перфорування шару матеріалу, яке полягає у створенні штучної структури, дозволяє зменшити його гідравлічний опір, збільшити швидкість підведення тепла до вологого матеріалу. Нами було досліджено гідродинаміку та кінетику сушіння у випадку суцільного шару біологічно активної маси за наявності штучної пористості (від 0.66 до 10 %). Результати досліджень представлені на рис. 1 та 2.

У випадку сушіння суцільного шару матеріалу (крива 4), при висиханні поверхні його шару за рахунок усадкових явищ починається процес тріщинотворення в матеріалі, характерною особливістю якого в даному випадку є виникнення тріщин значних розмірів, але невеликої їх кількості. Одночасно відбувається різке зменшення перепаду тисків, але інтенсивність сушіння залишається низькою, оскільки процес залежить від швидкості сушіння ділянок матеріалу між тріщинами, лімітуючою стадією якого є молекулярна дифузія.

У випадку сушіння матеріалу із штучною пористістю (криві 1-3), процес характеризується двома схожими періодами. Перший період – це різке