

УДК 633.52.631Ф

Деркач В.В.

(Вінницький державний аграрний університет)

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОЛОЖЕННЯ ЛИСТОВОЇ ЧАСТИНИ РОСЛИН

Рассмотрен вопрос снижения механических потерь при заготовке сена из бобовых трав. Проведены теоретические исследования процесса увлажнения листовой части растений.

Decline of mechanical losses at laying-in of hay from leguminous herbs is considered. Theoretical researches of process of moistening of sheet part of plants are conducted.

Вступ

При сушінні бобових трав на сіно мають місце значні механічні втрати, основна частина яких припадає на обламування листків і суцвіть а також верхніх частин стебел. Механічні втрати сухої речовини коливаються в доволі широких межах і складають від 15 до 50 %, що істотно позначається на загальній поживності сіна та вмісті протеїну в ньому.

Це відбувається тому що при зміні вологості трави, змінюються її фізико-механічні властивості. Листки бобових трав втрачають свою еластичність і стають крихкими вже при загальній вологості рослин 45-50%, а листки при цьому можуть досягати вологості 25-30%. Тому технологія заготівлі сіна передбачає ворущіння і згрібання пров'яленої маси у валки при вологості трав вищій ніж критична (при якій листки стають крихкими).

Одним із способів зниження механічних втрат є штучне зволоження висушеної у полі трави перед підбиранням [1]. За рахунок цього листки стають більш еластичними і стійкими до обламування.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій

Задачі масообміну процесів сорбції-десорбції (зволоження-сушіння) рослинних матеріалів [2,3], зазвичай вирішуються без врахування переміщення вологи всередині матеріалу, особливо за умов невисокої (20-30°C) температури навколишнього середовища.

Для розрахунків експозиції сушіння (зневоднення) капілярно-пористих, в тому числі і рослинних матеріалів використовують рівняння О.В.Ликова, яке описує зміну середньої за об'ємом в часі.

Стосовно процесів кінетики зволоження (сорбції) це рівняння використовується в модифікованому вигляді [4,5]:

$$\frac{dU}{d\tau} = K_s (U_p - U), \quad (1)$$

де U - поточний вологовміст матеріалу, кг/кг с.р.;

U_p - рівноважна вологість матеріалу (кг/кг с.р.), яка є функцією температури і відносної вологості оточуючого середовища і визначається із ізотерми сорбції;

K_s - коефіцієнт зволоження (аналог коефіцієнта сушіння), 1/с.

При експериментальному визначенні значення K_s , розв'язок рівняння (1) дає можливість визначити експозицію зволоження підсушеної трави:

$$\tau = \frac{1}{K_s} \ln \frac{U_p - U_0}{U_p - U}, \quad (2)$$

де U_0 - початкова вологість підсушеного матеріалу, який потребує зволоження.

Але відповідно до поставленої задачі зволоження сухої частини пров'яленої трави, зокрема листя, з метою збільшення його пружності і відповідно опору відламуванню, найбільший інтерес являє визначення не середньої об'ємної вологості листка, а його центральної частини – середньої жилки.

Зволоження рослинної (трав'яної) маси, як природне (випадання роси, туман) так і штучне (зволоження оприскуванням) обумовлено зволоженням поверхневого шару (поглинання вологи мікропорами). При цьому виникає градієнт концентрації вологи матеріалу, в результаті чого відбувається дифузійне перенесення вологи у внутрішні шари.

Таким чином, визначення густини потоку вологи, що переміщується від вологого повітря до поверхні і концентрації вологи всередині тіла листка оснований на рішенні задач дифузії аналогічних задачам нестационарної теплопровідності [5].

Постановка завдання

Отримати математичні моделі які б дозволили визначати час зволоження листової частини з урахуванням розподілу вологи по товщині листка.

Основна частина

Теоретичні дослідження проводились за допомогою методики, що базується на відомих законах механіки.

Вважаючи процес перенесення маси одномірною зміною концентрації вологи в об'ємі листка, подібному до нескінченної пластини, у часі можна описати диференціальним рівнянням у вигляді [6,7]:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (3)$$

де $C(x, \tau)$ - поточне значення концентрації вологи в листку, кг/м³;

x - поточна координата (товщина листка), м;

D - коефіцієнт дифузії води в матеріалі (коефіцієнт масопровідності), м²/с.

Для отримання одноразового розв'язку рівняння масопровідності (3) необхідно доповнити умовами однозначності – краєвими умовами, які наряду з значеннями фізичних параметрів включають початкові та граничні умови.

Початкове розподілення концентрації вологи (вологомісту) в листку в першому наближенні прийемо рівномірним:

$$C(x, 0) = C_0 = Const \quad (4)$$

За аналогією з теплопередачею [8] визначимо механізми та способи задання граничних умов. Зовнішній масоперенос при зволоженні листової частини рослин може відбуватися за двома схемами.

В першому варіанті приймається, що на поверхні розділу фаз (твердої і повітряної) має максимальний дифузійний потік, або випадання конденсату, що призводить до практично миттєвого зволоження поверхні листка.

В цьому випадку, зовнішньо дифузійний опір і приймаємо граничну умову першого роду:

$$C_n = C_p, \quad (5)$$

де C_n - концентрація вологи на поверхні листка, кг/м³;

C_p - рівноважна концентрація, кг/м³.

Інший механізм поглинання пари води з повітря зумовлений зовнішньою дифузією, рушійною силою якої є різниця парціальних тисків пари води в оточуючому середовищі (повітрі) та безпосередньо у поверхні листка.

Густина потоку пари, що дифундує з оточуючого повітря до поверхні (при $P_c > P_{n,n}$), де P_c - парціальний тиск водяної пари в повітрі, $P_{n,n}$ - тиск пари у поверхні матеріалу, визначається рівнянням [6,7]:

$$j = \beta_p (P_p - P_c), \quad (6)$$

де β_p - коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків пари, кг/м²·с·Па.

Відповідно до рівняння стану ідеальних газів [9] концентрацію пари можна визначити із співвідношення:

$$P = C_{II} \cdot R_{II} \cdot T, \quad (7)$$

де R_{II} - газова стала водяної пари, Дж/кг·К,

T - абсолютна температура пари, °К

Підставивши (7) в (6) будемо мати:

$$j = -\beta(C'_{II} - C_c), \quad (8)$$

де C'_{II} - концентрація пари, що знаходиться в контакті з поверхнею листка, кг/м³;

$$\beta = \frac{\beta_p}{R_{II} \cdot T} - \text{коефіцієнт масообміну, м/с.}$$

Рівняння (8) визначає густину потоку пари в приграничному шарі і співпадає з законом масовіддачі (Щукарева [9])

$$\frac{dW}{dF \cdot d\tau} = +\beta(C_c - C'_{II}), \quad (9)$$

де W - кількість водяної пари, що дифундує до поверхні, кг;

F - площа поверхні листка, м².

Припускаючи, що волога на поверхні листка не накопичується, а відразу адсорбується, повинно виконуватись балансове співвідношення [9]:

$$D_m \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_F = \beta(C_p - C), \quad (10)$$

де D_m - середнє значення коефіцієнта внутрішньої дифузії (масопровідності), м²/с;

$\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_F$ - градієнт концентрації.

Рівняння (10) відповідає граничній умові третього роду: кількість речовини, що підводиться до поверхні тіла за рахунок масопровідності, дорівнює кількості речовини, що відводиться від поверхні до внутрішніх шарів листка.

Таким чином математична модель процесу зволоження листової частини пров'яленої трави має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \tau} &= D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \\ C_{\tau=0} &= C_0 \\ -\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_F + \frac{\beta}{D_m}(C_p - C) &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

при $x = \pm R$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

при $x = 0$

Або переходячи від концентрації вологи до вологовмісту через співвідношення $C = u \cdot \rho_0$, де ρ_0 - густина абсолютно сухої речовини листка, кг/м³:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (12)$$

$$u_{\tau=0} = u_0$$

$$-\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0} = 0; \quad -\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_F + \frac{\beta}{a_m}(u_p - u) = 0, \quad \text{при} \quad x = \pm R \quad (13)$$

Розв'язок рівняння виду (12) при граничних і початкових умовах (13) аналогічно рівнянню теплопровідності відомий [6,8]:

$$\frac{u - u_0}{u_p - u_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (14)$$

$$A_n = \frac{2 \cdot \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} = (-1)^{n+1} \frac{2Bi\sqrt{Bi^2 + \mu_n^2}}{\mu_n (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)};$$

μ_n - корені характеристичного рівняння: $\operatorname{ctg} \mu = \frac{1}{Bi} \mu$ значення яких наведені в [8]

в залежності від критерія $Bi_m = \frac{\beta}{a_m} R$; $Fo = \frac{a_m}{R^2} \tau$, де R - половина товщини листка;

Середнє значення вологовмісту листка визначиться за очевидним рівнянням:

$$\bar{u}(\tau) = \frac{1}{R} \int_0^R u(x, \tau) dx, \quad (15)$$

або з урахуванням (14) в розгорнутому вигляді:

$$\bar{u}(\tau) = \frac{\bar{u} - u_0}{u_p - u_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \exp(-\mu_n^2 Fo)$$

$$B_n = \frac{A_n \cdot \sin \mu_n}{\mu_n};$$

ц, кг/кг с.р.

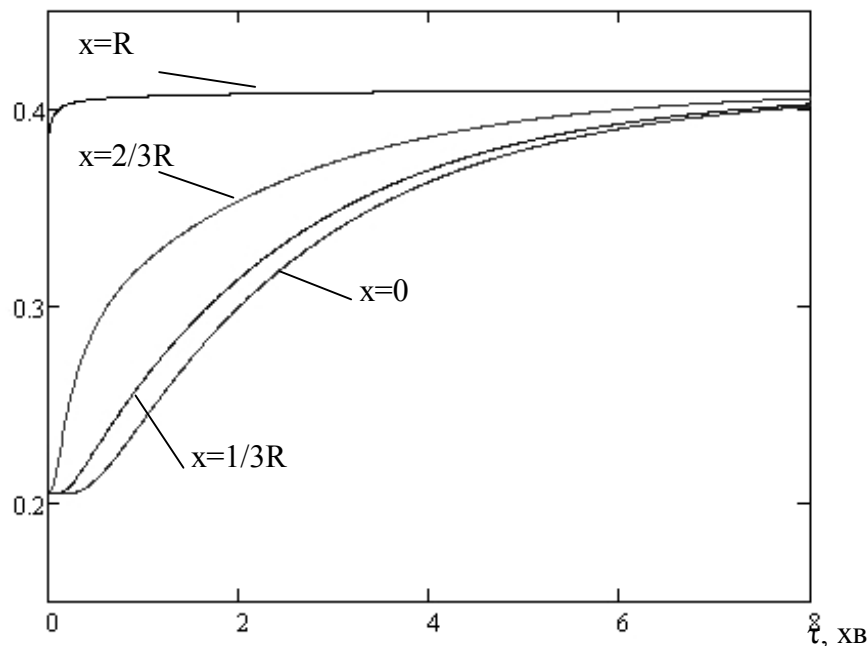


Рис. 1. – Криві зміни вологовмісту за часом і координатою (x) (товщиною листка)

Коефіцієнти масообміну β і масопровідності a_m визначались за даними експериментальних досліджень сорбції листям люцерни вологи з повітря.

Геометрична інтерпретація розв'язку рівняння (14) представлена на рис. 1 у вигляді кривих зміни вологовмісту за часом і координатою (товщиною листка).

Як впливає з аналізу графіка, середня жилка листка досягає критичного вологовмісту (при якому листок починає кришитись) 0,35 кг/кг с.р на протязі приблизно 4 хвилини.

Висновки

1. Розроблено математичну модель на базі використання розв'язку рівнянь теплопровідності дозволили адекватно (розходження становлять 8%) моделювати процес зволоження листової частини рослин.
2. На основі проведених досліджень встановлено, що час необхідний для зволоження середньої частини листка до вологості вищої ніж критична (при якій листок починає кришитись) лежить в межах 4-6 хвилин.

Література

1. Гарькавий А.Д., Серета Л.П., Петриченко В.Ф. та інші. Деклараційний патент на корисну модель «Спосіб заготівлі кормів» № 6410 від 16.05.2005р.
2. Фальковский И.М. Сушка и увлажнение лубоволокнистых материалов. – М.: Гизлегпром, 1954 – 410 с.
3. Суметов В.А. Сушка и увлажнение лубоволокнистых материалов. – М.: Легкая индустрия, 1980 – 336 с.
4. Лыков А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения. 1938 – 590 с.
5. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968 – 470с.
6. Лыков А.В. Теплопроводность и диффузия в производстве кожи м-л. 1941.
7. Рудобаишта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.:Химия, 1980 – 248с.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967 – 599с.
9. Ульянов В.М., Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 1988. – 351 с.