

ІНСТИТУТ МЕХАНІЗАЦІЇ ТА ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНСЬКОЇ АКАДЕМІЇ АГРАРНИХ НАУК  
(ІМЕСГ УААН)

На правах рукопису

КОТОВ БОРИС ІВАНОВИЧ

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ  
ЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Спеціальність:

05.20.01 - Механізація сільськогосподарського виробництва

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

*Б.Кот*



00754102 (J)

наукової праці.

Робота виконана в Інституті механізації та електрифікації сільського господарства Української академії аграрних наук.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор, академік УААН МАРТИНЕНКО І.І.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, академік УААН ПОГОРІЛИЙ Л.В.,  
доктор технічних наук, професор, чл.-кор. УААН НОВИКОВ Ю.Ф.,  
доктор технічних наук, професор ДРАГАНОВ Б.Х.

Провідна установа: НДІ ФЕРМАШ.

Захист відбудеться "29" 09 1994 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 020.30.01 по присудженню наукового ступеня доктора технічних наук в Інституті механізації та електрифікації сільського господарства УААН за адресою: 255133, Київська область, Васильківський район, смт.Глеваха-1, вул Вокзальна, 11, кімната 613.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту механізації та електрифікації сільського господарства УААН за вказаною вище адресою.

Автореферат розісланий "22" 08 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради,  
кандидат технічних наук

*Грицишин М.І.* ГРИЦИШИН М.І.

Актуальність. Однією з важливих проблем в сільськогосподарському виробництві та переробних галузях промисловості є проблема забезпечення прискореної переробки та збереження зібраного врожаю, у тому числі зелених рослин, які є основним джерелом протеїну та вітамінів у кормах сільськогосподарських тварин і птахів, а також вихідною сировиною для переробної промисловості.

Сушіння рослинної сировини порівняно з іншими методами її консервування забезпечує максимальне збереження корисних (поживних) речовин та вітамінних інгредієнтів, тому інтенсифікацію процесів зневоднення можна розглядати як один із найефективніших способів збільшення виходу натуральної продукції з одиниці посівних площ.

Разом з тим сушіння є найбільш енергоємним процесом переробки, частка якого складає 50...60% сукупних витрат енергії на одержання продукту, придатного для тривалого зберігання.

Тому, внаслідок обмеження використання традиційних енергоносіїв, виникла проблема, вирішення якої вимагає пошуку та розробки методів підвищення ефективності обладнання та зниження енергоємності процесу сушіння рослинної сировини.

Мета досліджень: розробка науково-технічних основ підвищення технологічної та енергетичної ефективності сушіння рослинної сировини шляхом інтенсифікації тепломасообмінних процесів, утилізації теплових втрат і сонячної енергії та створення на цій базі високопродуктивного енергоекономного обладнання.

Об'єкти досліджень: листостеблову рослинна сировина (трави, зернові і технічні культури), технологічні операції (сушіння, подрібнення, теплова та електрофізична обробка) та обладнання (сушарки, теплообмінні пристрої, геліопідігрівачі).

Наукову новизну складають:

1. Математичні моделі процесів сушіння листостеблових матеріалів, створені на основі уточнених та розвинутих уявлень про механізми тепломасообміну, виходячи з яких розроблено методи

2  
впливу на фактори, які прискорюють масоперенесення або перешкоджають розвитку явищ, що обмежують видалення вологи.

2. Нові дані про властивості та узагальнені закономірності зневоднення рослинної сировини різного ступеня попередньої обробки; експериментально обгрунтовані та математично узагальнені рівняння кінетики нагріву та вологовидалення при різних способах сушіння, зокрема у завислому, щільному, вихровому та перемішуючому шарах, а також при суміщенні процесів сушіння і подрібнення.

3. Енергозберігаючі методи інтенсифікації процесів сушіння за рахунок впливу на механізми зміни закономірностей переміщення або подрібнення матеріалу, технічні принципи їх реалізації у ромислових сушарках сільськогосподарського призначення.

4. Теоретичні передумови та результати експериментальних досліджень інтенсифікації тепломасообмінних процесів при суміщенні процесів подрібнення та сушіння листостеблових матеріалів, які дозволили виявити нові технологічні та теплофізичні ефекти.

5. Результати досліджень методів і засобів підвищення ефективності сушарок шляхом утилізації теплоти відпрацьованого теплоносія та обгрунтовані на їх основі раціональні режими сушіння, які забезпечують підвищення продуктивності та зменшення енерговитрат.

6. Математичні моделі сонячних повітропідігрівників для сушарок, які визначають вплив технологічних і конструктивних параметрів на енергетичну та технологічну ефективність геліопідігріву і одержані на їх основі залежності теплової продуктивності та енергетичної ефективності від параметрів колектора, а також методи і технічні засоби інтенсифікації теплообміну в геліоколекторах.

Новизна розробок засвідчена 23-ма авторськими свідоцтвами на винаходи.

Практичну цінність складають:

технологічні процеси, вихідні вимоги та технічні завдання на проєктування нового та модернізацію існуючого обладнання для сушіння рослинної сировини;

методичні рекомендації для виробництва зневоднених кормів з рослинної сировини та для підвищення ефективності використання сушильного обладнання;

методики розрахунків та обґрунтування режимів сушіння і параметрів обладнання разом з узагальненими емпіричними залежностями і даними, що характеризують механіко-технологічні та теплофізичні властивості сировини, що використовують при проектуванні сушильного обладнання і розробці систем автоматичного проектування;

конструктивно-технологічні схеми обладнання, їх параметри та режими сушіння рослинної сировини різних видів.

Реалізація результатів. Результати теоретичних та експериментальних досліджень використані при створенні нових зразків сушильного обладнання (комбінованого сушильного агрегату з сушаркою-подрібнювачем та теплогенератором на твердому паливі - АЕМ-0,65 РТ; агрегату для сушіння кормів АЕМ-0,85; комплекту вентиляційно-сушильного обладнання з електроакумуляційним пристроєм ВЕА-Ф-30; геліоповітропідігрівальника для сушарок періодичної дії ПСК-Ф-200; технічної документації механізованої баштової геліосушарки МЕС-20); при здійсненні модернізації серійного сушильного обладнання (сушильного агрегату АЕМ-0,65 / Ж.Г./; сушильного агрегату АЕМ-1,5 РБ / Г.Ж./; установки досушування сіна УВС-16А) та при розробці окремих вузлів сушильних агрегатів (регенеративного теплосмінника, теплогенератора, відокремлювача - охолоджувача сухої маси, сушильних барабанів).

Протягом 1976-1990 рр. підприємствами сільськогосподарського машинобудування було виготовлено понад 42 тис. одиниць нового та модернізованого сушильного обладнання.

Апробація роботи. Основні положення і результати роботи доповідались, обговорювались і були схвалені на Республіканській науковій конференції "Напрямки підвищення ефективності і раціонального використання теплоти у сільському господарстві України" (Запоріжжя, 1987р.); на Всесоюзній науковій конференції "Питання землеробської механіки" (Москва, 1977р.); на Республіканській науково-технічній нараді "Розробка та впровадження високоефективних сушильних установок" (Сімферополь, 1978 р.); науково-технічних конференціях по проблемах створення нових технологій та обладнання у кормовиробництві

(Вільнюс, 1979, 1981, 1985рр.); на Всесоюзних наукових конференціях по вдосконаленню теорії, технології та техніки сушіння (Чернігів, 1984р., Полтава, 1984р., Черкаси, 1987р.); на Всесоюзній конференції "Проблеми механізації сільськогосподарського виробництва" (Москва, 1985 р.); на Всесоюзній нараді по використанню сушарок барабанного типу в промисловості та сільському господарстві (Яремча, 1988 р.); на Республіканській нараді по питаннях теорії та практики сушіння (Київ, 1989 р.); на Республіканській нараді "Енергозберігаючі технології виробництва, заготівлі та зберігання кормів" (Вінниця, 1988р.); на Всесоюзній конференції "Енергозберігаюче обладнання АПК" (Москва, 1990р.); на Всесоюзній конференції "Енергозбереження у сільському господарстві" (Київ, 1990р.); на науковій конференції "Енергозберігаючі технології та технічні засоби для виробництва сільськогосподарської продукції" (Глеваха, 1993р.).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 54 статтях в науково-технічних виданнях, працях науково-технічних конференцій і нарад, а також у 23 авторських свідоцтвах на винаходи.

Структура та об'єм дисертації. Основна частина має вступ, сім розділів, загальні висновки, список літератури. Загальний об'єм складає 280 сторінок основного тексту, 167 рисунків, 14 таблиць, список літератури включає 245 найменувань, додатки на 42 сторінках.

На захист виносяться результати, сформульовані в рубриках "Наукова новизна" та "Практична цінність".

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність проблеми, мета досліджень і шляхи її вирішення, а також положення, що виносяться на захист.

### 1. Загальний стан проблеми і задачі досліджень

Аналізом сучасних способів переробки зелених рослин для підвищення стійкості їх зберігання показано, що сушіння є найбільш ефективним методом консервування рослинної сировини при виробництві зневоднених кормів для сільськогосподарських тварин і птахів, який забезпечує мінімальні втрати поживних речовин, а інтенсифікація сушіння дозволяє підвищити вихід

Сілка, вітамінів та інших корисних речовин з одиниці посівної площі кормових культур.

Технологія зневоднення рослинної сировини, яка базується на загальних положеннях теорії сушіння, розвинута в працях О.В.Ликова, П.А.Ребіндера, А.С.Гінзбурга, О.А.Кремньова, А.А.Долинського, В.Р.Боровського, Г.К.Філоненка, П.С.Куца, І.Т.Кретова, О.М.Кашуріна, А.П.Рисина, Е.Т.Тутової, О.Ф.Буляндри, Б.І.Леончика, М.М.Гринчика, В.В.Корнараки, М.Л.Гірника, О.П.Калиновської, З.Д.Мазяка, В.І.Аніськіна, В.І.Алейникова, Л.О.Орлова, О.Кришера, В.Мальтрі, Д.Шервуда, Р.Уайта та інших дослідників.

Основи теорії, технології та техніки сушіння листостеблових матеріалів, викладені в працях В.І.Пятрушевічюса, В.Ю.Валушиса, Г.І.Піуновського, К.Ф.Терпиловського, Ю.О.Чурсинова, Н.Д.Хомутського, А.М.Худоногова, Є.І.Храпача, Е.П.Шелудякова, Ю.Л.Фрегера, Е.В.Шнорявічюса, В.А.Корягіна, Ю.В.Єсакова, М.Ф.Лячука, А.Д.Гаркавого, В.О.Тихомирова, К.Д.Макарова та інших, сприяли впровадженню прогресивних технологій та обладнання у сільськогосподарське виробництво.

Аналізом наукових положень, розвинутих у працях А.А.Долинського, О.Л.Данилова, Л.В.Погорілого, А.В.Дьоміна, Ю.Ф.Новикова, І.І.Мартиненка, Б.Х.Драганова, В.А.Чапурина, Д.Мурадова, Г.Умарова та інш., визначено основні напрями економії енергоресурсів, утилізації теплоти, використання вторинних та поновлюваних джерел енергії, що складають основу вирішення задач енергозберігаючого сушіння рослинної сировини.

Проте існуючі технічні принципи та способи інтенсифікації сушіння і енергозбереження не вичерпують можливості подальшого вдосконалення технології і техніки сушіння рослинної сировини, бо сучасні потреби виробництва та обмеженість паливно-енергетичних ресурсів вимагають розробки нових, більш ефективних методів енергозбереження та підвищення продуктивності обладнання.

У відповідності до поставленої мети досліджень та виходячи з енергозберігаючої концепції інтенсифікації сушіння, в роботі розв'язувались такі задачі:

- на основі вивчення і узагальнення даних про властивості сировини як об'єкта сушіння уточнити механізм перенесення теплоти і маси та на їх основі розробити теоретичні передумови

інтенсифікації сушіння листостеблових матеріалів відносно критерію енергозбереження;

- виявити та узагальнити основні закономірності видалення вологи і нагрівання матеріалу при різних методах (теплофізичних та механічних) впливу на сировину та способах сушіння;

- обґрунтувати принципи підвищення ефективності використання теплових викидів сушарок та геліопідігрівання повітря для сушіння і виявити раціональні схеми, конструктивні параметри та режими роботи тепловикористовуючих систем при сушінні;

- удосконалити технології і обладнання для сушіння рослинної сировини, що забезпечують підвищення продуктивності та зниження питомих витрат енергії;

- провести виробничу перевірку і визначити ефективність нового та модернізованого обладнання для сушіння листостеблових матеріалів.

## II. Теоретичні передумови інтенсифікації сушіння рослинної сировини та зниження енергоємності процесів.

На основі комплексних досліджень та узагальнення структурних, механічних, теплофізичних та ігроермічних властивостей рослинної сировини (листочестеблових матеріалів) подана їх характеристика як об'єкта сушіння. Визначено залежність теплоємності, теплопровідності і температуропровідності від вологості для різних видів рослин.

Для математичного опису ізотерм сорбції (десорбції) в інтервалах вологості повітря  $0,1 < \varphi < 1$ , температури-  $18^{\circ}\text{C} < t < 60^{\circ}\text{C}$  запропоновано узагальнене рівняння

$$U_p = A \alpha^{\varphi} b^t, \quad (1)$$

де  $A$ ,  $\alpha$ ,  $b$  - коефіцієнти, що складають:  $A = 0,017$ ,  $\alpha = 76,4$ ,  $b = 0,98$  (сорбція);  $A = 0,0035$ ,  $\alpha = 42,2$ ,  $b = 0,98$  (десорбція).

В інтервалах зміни вологості сировини  $U=0,18 \dots 1,0$  кг/кг і температури-  $20 \dots 60^{\circ}\text{C}$  ізотерми десорбції можна апроксимувати виразом для тиску пари в матеріалі

$$P_n = \alpha_p U^m e^{P_n}. \quad (2)$$

З врахуванням залежності (2), законів зберігання енергії та маси, на основі фізичної моделі тепломасоперенесення

Куца-Гринчика, одержано диференціальні рівняння перенесення вологи в рослинних матеріалах

$$\frac{dUx}{dt} = -\frac{d}{dx} \left\{ \rho_x D^*(\theta) \left[ f_1(\theta, U) \nabla \theta + f_2(U, \theta) \nabla U \right] \right\} - I; \quad (3)$$

$$m_0 \frac{d(\theta, \rho_n)}{dt} = \frac{d}{dx} \left[ \frac{K_n}{\eta} (B U^m \theta^n)^2 \left( \frac{m}{\theta} \nabla \theta + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{n}{U} \nabla U \right) \right] + I; \quad (4)$$

$$C \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dx} \left[ \lambda(U, \theta) \nabla \theta \right] + (r_0 + r_c) I, \quad (5)$$

$$\text{де: } f_1(\theta, U) = A N \theta^{N-1} - \frac{R}{V_x''} \left[ (N-m) (1 + \ln \theta) - \ln \frac{B}{A} U^n \right],$$

$$f_2(U, \theta) = \frac{Rn}{V_x'' U_x} \theta, \quad D^*(\theta) = K f(\theta) / \eta,$$

A, B, N, n, m - сталі коефіцієнти.

Аналіз одержаних рівнянь дозволив виявити основні напрямки інтенсифікації внутрішнього тепломасоперенесення у рослинних матеріалах.

Оскільки інтенсивність перенесення вологи визначається величиною градієнтів тиску рідини  $\nabla P_{ж}$  та пари  $\nabla P_{п}$ , що залежать від градієнта температури  $\nabla \theta$ , напрям якого при традиційних способах інтенсифікації (на першому етапі процесу) перешкоджає переміщенню вологи до поверхні, а його величина зменшується в часі, то для інтенсифікації суттіння запропоновано використання ефекту "оновлення" градієнта, що полягає у примусовій зміні його величини та напрямку в міру зневоднення тіла шляхом утворення нових поверхонь випаровування за допомогою подрібнення (розщеплення) часток матеріалу. Якщо в процесі нагрівання рослинної часточки, коли волога під дією  $\nabla \theta$  переміщується до центра, механічно розділити її вздовж осі симетрії на дві частини, то випаровування вологи з новоутвореної

поверхні спричинить деформацію температурного поля та співпадання напрямів градієнтів  $\nabla \theta$  і  $\nabla U$ , що підсилуватиме переміщення вологи до поверхні. Інтенсифікація досягається, завдяки підвищенню величин  $\nabla U$  і  $\nabla \theta$  та співпаданню їх напрямків.

Враховуючи, що сушіння після розділення рослинних часток приводить до релаксації градієнтів  $\nabla \theta$  і  $\nabla U$ , запропоновано періодично подрібнювати матеріал в процесі сушіння.

При цьому виникає новий ефект - різке зниження середньої температури часток, що утворилися після подрібнення. Причому, чим вища початкова температура матеріалу, тим більше росте ступінь зниження його температури після подрібнення.

Виходячи з припущення, що швидкість сушіння змінюється у часі за експоненціальним законом:  $N(\tau) = N_1(d) e^{-K_1 \tau}$ ,

кінетика нагрівання частки рослини буде описуватись рівнянням:

$$\bar{\theta}(\tau) = t_0 - (t_0 - \theta_0) e^{-A_1(\alpha)\tau} + \frac{A_2(N_1)}{A_1(\alpha) - K_1} (e^{-K_1 \tau} - e^{-A_1(\alpha)\tau}). \quad (6)$$

Результати розрахунків за виразом (6), зроблені для ступінчастого зменшення розміру частинок, наведені графічно на рис. 1. Співставлення їх з експериментальними даними (відхилення не перевищує 6...10 %) доводить реальну можливість керування процесом сушіння (стабілізацію температури тіла на попередньо заданому рівні), забезпечуючи інтенсифікацію зневоднення матеріалу.

Подрібнення матеріалу в процесі сушіння особливо ефективно при використанні сушильного агента з підвищеним вмістом пари ( $d = 120...340$  г / кг.). Аналізом критеріального рівняння теплообміну встановлено, що при збільшенні вмісту пари у повітрі, наприклад, з 70 г / кг до 140 г / кг, коефіцієнт теплообміну збільшується майже у 1,5 рази ( $\alpha_{d1} / \alpha_{d2} = 1,45...1,5$ ). Це підтверджують і експериментальні дослідження кінетики сушіння у зволоженому повітрі.

Для визначення впливу швидкості руху подрібненого матеріалу на розподіл основних параметрів процесу сушіння по довжині сушильного тракту на основі одержаної статистичної характеристики процесу:  $U = (K_3 / K_2) (t_0 - \bar{\theta})$ , сформульоване система диференціальних рівнянь, що описує процес сушіння в

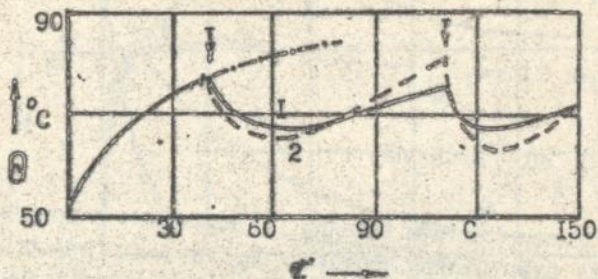


Рис. 1. Кінетика нагрівання частинок при подрібненні.  
1 - експеримент, 2 - розрахунок.

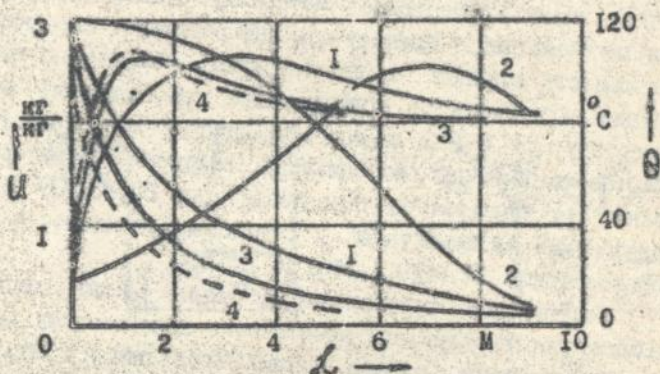


Рис. 2. Розподіл вологості та температури матеріалу по діаметрі барабана для варіантів:

$$\begin{aligned}
 &1. \quad 1 - V(x) = \text{const} \quad 2. \quad V(x) = \alpha \exp(kx) \\
 &3. \quad V(x) = a_2 \exp(k_2 x) \quad V(x) = (n + mx) \Big|_{x=2n} + \\
 &\quad + V_0 \exp(-kx) \Big|_{x=2 \dots 5n}
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{g_i} G_{O_1} V_{m_1}^{-1}(x) (t - \bar{\theta}_1) dx = G_{m_1}(U_1) C_{m_1}(U_1) d\bar{\theta}_1 + G_{O_1} r(\theta_1) dU_1 \\ L \rho(X) C_p(X) dt = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_{g_i} G_{O_1} (t - \bar{\theta}_1) \bar{V}_{m_i}^{-1}(x) dx \quad (7) \\ dU_1 = K_i d(t - \bar{\theta}_1) \\ \sum_{i=1}^{i=n} G_{O_1} dU_1 = L \rho(X) dX. \end{array} \right.$$

Розв'язання системи рівнянь (7) проведено з врахуванням зміни швидкості переміщення матеріалу  $V_m(x)$  по довжині сушильного тракту за різними законами. На рис 2. наведені дані розподілу вологості та температури матеріалу по довжині сушильного тракту барабанної сушарки при різних закономірностях зміни швидкості руху матеріалу по довжині обертового барабана, що свідчать про реальну можливість керування процесом сушіння шляхом зміни концентрації матеріалу вздовж сушильного тракту. Для інтенсифікації процесу сушіння рослинної сировини доведено доцільність сушіння в двостадійному режимі: на першій стадії сушіння суміщене з подрібненням при зниженні вологовмісту матеріалу до  $U=1,0$  кг/кг, на другій стадії-досушування в обертовому барабані при зниженні вологовмісту матеріалу до  $0,13$  кг/кг та температури теплоносія на  $200...300^{\circ}C$ . При цьому подрібнення здійснюється у середовищі теплоносія з підвищеним вологовмістом  $X \geq (120...180) 10^{-3}$  кг/кг.

Досушування під'ялених у полі рослин характеризується великою нерівномірністю початкового вологовмісту полідисперсних фракцій (листя, стебла, суцвіття та інш.) і нерівномірним за висотою шару розподілом щільності рослинної маси та кількості теплоти самозігрівання.

Це призводить до того, що в одному об'ємі шару можуть одночасно існувати масообмінні процеси протилежної спрямованості, тобто сушіння одної частини та зволоження іншої частини матеріалу.

Для математичного опису процесів сушіння у нерухомому шарі, виходячи з припущення, що рушійною силою процесу масообміну є

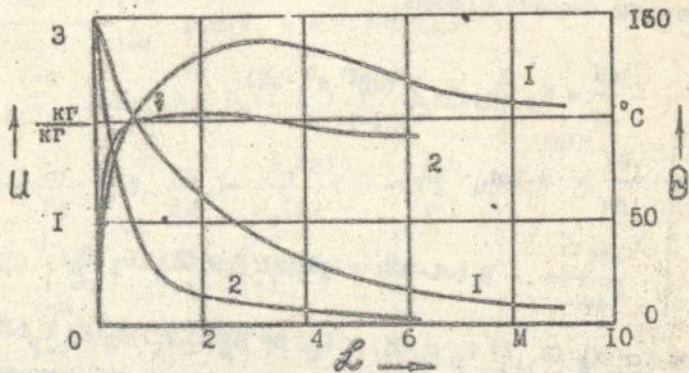


Рис. 3. Розподіл вологості та температури матеріалу по довжині сушального тракту: I - сушіння подрібненої сировини; 2 - сушіння суміщене з подрібненням.

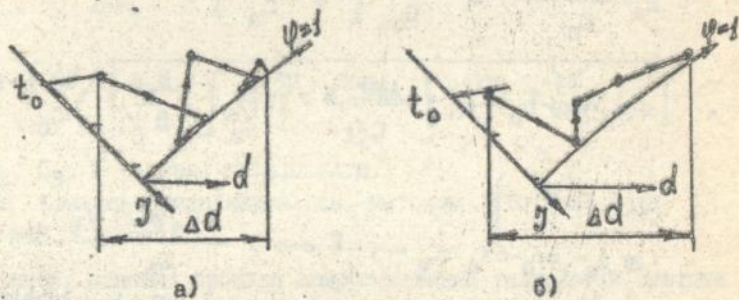


Рис. 4. Зміна параметрів повітря при його фільтруванні через шар листостеблової сировини у напрямку:  
а) зменшення природної щільності шару;  
б) її збільшення.

різниця тиску водяної пари у матеріалі та у фільтруючому повітрі, одержана система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{dU}{d\tau} = K_{\beta} (t_c, V_c) (\sigma U^m \rho^n - bX) \\ \frac{dX}{dz} = A (\sigma t - bX) \\ \frac{dt}{dz} = -B (\sigma t - bX) + q(U, \theta) f_p \rho_0(Z) \cdot (G_{\beta} C_{\beta})^{-1} \end{array} \right. \quad (8)$$

де  $A = K_{\beta} (t_c, V_c) f_p \rho_0(Z) / G_{\beta}$ ,  $B = K_{\beta} (t_c, V_c) \rho_0(Z) f_p r / G_{\beta} C_{\beta}$ .

На основі аналізу цієї моделі показано, що напрямок процесу визначається характером розподілу температури матеріалу у шарі відносно напрямку руху повітря. Також одержана умова запобігання утворення туману у фільтруючому повітрі та зволоження матеріалу у шарі:

$$X_0 + \frac{\sigma A D}{C_0} H + \frac{A}{C_0} \left[ \Delta_0 - \frac{\sigma D}{C_0} \right] (1 - e^{-C_0 H}) \leq \\ \leq \sigma_D \exp b_D \left\{ t_0 + \frac{AbD}{C_0} H + \frac{B}{C_0} \left[ \frac{D}{B} (1 - \frac{bA}{C_0}) - \Delta_0 \right] x \right. \\ \left. x (1 - e^{-C_0 H}) \right\}, \quad (9)$$

де  $\Delta_0 = \sigma t_0 - bX_0$ ;  $C_0 = \left( \frac{r}{C_D} \sigma + b \right) \frac{K_{\beta} \rho(z) f_p}{G_{\beta}}$ ,  $D = q f_p \rho_0(z) / G_{\beta} C_{\beta}$

Числовим аналізом рівнянь (8) показано, що при фільтрації повітря крізь шар рослинної сировини у напрямку природнього ущільнення шару процес сушіння інтенсифікується, зменшується сорбційне зволоження висушених фракцій та виключається конденсація вологи на поверхні матеріалу.

Процеси сушіння у шарі багатокомпонентної сировини, компоненти якої відрізняються початковими параметрами та кінетичними коефіцієнтами, описуються диференціальними рівняннями:

$$\left\{ \begin{aligned}
 -\frac{dU}{d\tau} &= K_1(t) (U_1 - U_{p_1}(t, X)); \\
 C(U) \frac{d\theta}{d\tau} &= \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i \alpha_i \sigma_i (\bar{\theta} - t) - q(U, Z) - \\
 -r \left[ U_1 \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i K_1(t) - U_p(t, X) \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i K_1(t) \right]; & \\
 C_p \rho_b(X) \left( \frac{dt}{d\tau} + v_c \frac{dt}{dz} \right) &= \frac{\rho_0(z)}{m_0(z)} (\bar{\theta} - t) \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i \alpha_i \sigma_i; \\
 \rho_b(X) m_0(z) \left( \frac{dX}{d\tau} + v_c \frac{dX}{dz} \right) &= \left[ \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i K_1(t) U_1 - \right. \\
 \left. - U_p(t, X) \sum_{i=1}^{i=n} \mu_i K_1(t) \right] \rho_0(z) &
 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

при таких крайових умовах:

$$t|_{\tau=0} = t_n(\tau), \quad t|_{z=0} = t_{Bx}(\tau), \quad X|_{z=0} = X_n(\tau), \quad X|_{\tau=0} = X_n(\tau),$$

$$U_1|_{\tau=0} = U_n, \quad U_1|_{z=0} = U_{n1}, \quad \theta|_{\tau=0} = \theta(z),$$

$$\theta(z) = \frac{B_3}{C_3} - \sqrt{\left[ \frac{b_3}{C_3} - t_n(\tau) \right]^2 - \frac{2a_3}{C_3 k} \left[ \frac{e^{-kz} - e^{-kH}}{k} + z - H \right]}$$

де  $a_3, B_3, C_3, k$  - сталі коефіцієнти.

Система рівнянь розв'язувалась методом "сіток" (в модифікації Ю.В. Єсакова).

Таким чином, основні процеси запропонованих технологій сушіння та способи їх інтенсифікації подано математичними моделями, а наліз яких дозволив сформулювати принципи підвищення ефективності сушіння листостеблових матеріалів енергозберігаючими методами.

### Ш. Експериментальні дослідження процесів сушіння листостеблових матеріалів.

Дослідження проведені на лабораторних стендах та дослідних

зразках промислового сушільного устаткування, обладнаних контрольно-вимірвальними засобами. Вивчалися закономірності вологовидання та нагрівання багатьох видів рослинних матеріалів ( цілі рослини, їх часточки, порції матеріалу, стеблова різка різного ступеня подрібнення, листя трав і т.п.) при різних способах сушіння: у завислому стані, у щільному фільтручному шарі, у вихровому кільцевому шарі ( з різним ступенем подрібнення рослин); сушіння окремих часток та сушіння суміщене з подрібненням.

Результати досліджень узагальнені у вигляді залежностей безрозмірного вологовмісту і безрозмірної середньооб'ємної температури матеріалу від безрозмірного єдиного комплексу  $\frac{N\tau}{U_0}$ .

Узагальнені кінетичні залежності процесів сушіння мають однотиповий характер, що свідчить про однаковість властивостей рослинної листостеблової сировини та механізмів тепло- і масообміну. Обробка експериментальних даних дала змогу одержати єдині залежності кінетики зневоднення рослинних матеріалів  $U/U_0 = f_1(N\tau/U_0)$ , їх нагріву  $e/\theta_k = f_2(N\tau/U_0)$  та узагальнену температурну криву  $e/\theta_k = f_3(U)$ , які у розгорнутому вигляді подані рівняннями:

$$\frac{U}{U_0} = 1,012 - 1,1 \left( \frac{N\tau}{U_0} \right) + 0,314 \left( \frac{N\tau}{U_0} \right)^3 - 0,08 \left( \frac{N\tau}{U_0} \right)^4; \quad (11)$$

$$\frac{e}{\theta_k} = 0,15 + 5 \frac{N\tau}{U_0} - 11,2 \left( \frac{N\tau}{U_0} \right)^2 + 11,4 \left( \frac{N\tau}{U_0} \right)^3 - 5,2 \left( \frac{N\tau}{U_0} \right)^4 + 0,9 \left( \frac{N\tau}{U_0} \right)^5; \quad (12)$$

$$\frac{e}{\theta_k} = 2,23 - 7,35 \frac{U}{U_0} + 13,9 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 - 8,5 \left( \frac{U}{U_0} \right)^3. \quad (13)$$

З рівняння ( 13 ) одержана узагальнена залежність критерію Ребіндера від вологовмісту матеріалу.

$$Rb = C(U) \left( -3,7U^2 + 4,6U^3 - 2,125U^4 \right) / \tau. \quad (14)$$

Залежність максимальної швидкості сушіння від параметрів матеріалу та режимів процесу апроксимовані рівнянням

$$N = At_C^h v_C^m \delta^p d^k, \quad (15)$$

яке дійсне при  $U=0,1...4$  кг/кг,  $t_c=30...410$  °C,  $\delta=1...5$  м/с,  $d=10...150$  г/кг.

Величини коефіцієнтів, що входять у вираз ( 15 ) становлять:

- для стеблової частини:  $h = 2,034$ ;  $m=0,41$ ;  $p = -0,48$ ;  $K=-0,26$ ;

- для листя:  $h = 2,44$ ;  $m=0,17$ ;  $p=0$ ;  $K=0,26$ .

При сушінні у вихровому кільцевому шарі подрібненої сировини кінетика сушіння апроксимована узагальненим виразом:

$$U/U_0 = 1 - 1,43 (Nt/U_0) - 0,675 (Nt/U_0)^2 - 0,12 (Nt/U_0)^3 \quad (16)$$

де  $N = 0,1 t_c^{1,35} \delta^{0,55}$ ; при  $t_c = 90...205$  °C,  $U_0 = 3...0,1$  кг/кг.

Кінетика сушіння з одночасним подрібненням листостеблової сировини наведена на рис. 5, а розподіл температури матеріалу на рис. 6.

Експерименти підтверджують принципову можливість стабілізації температури матеріалу на заданому рівні та дозволяють визначити особливості процесу: при підвищенні початкової температури матеріалу (перед подрібненням) величина зниження його температури  $\Delta \theta$  після подрібнення збільшується; розщеплення стебла вдовж при нагріванні змінює напрям і величину ( в бік збільшення ) градієнта температури; після кожного етапу подрібнення змінна швидкість сушіння підвищується.

Кінетика подрібнення визначається залежністю величини питомої поверхні матеріалу від навантаження на робочий орган ( $g_h$ ) та часу його взаємодії з матеріалом ( $t$ ).

$$r_h = 13,3 - 0,065 g_h + (18 - 0,05 g_h) (1 - e^{-0,125t}) \quad (17)$$

При сушінні подрібненої сировини в обертових барабанах зміна вологовмісту матеріалу визначається емпіричним рівнянням.

$$U = U_h (1 - \alpha \delta t) \exp(-p \delta t) \quad (18)$$

а функціональний зв'язок між параметрами матеріалу та режимами процесу при цьому апроксимовано залежністю

$$W_2 = K_\delta (t_2 - 37,3)^{-1} (1951 - t_1) (51,3 + W_1) (62 - \delta) \quad (19)$$

Для процесу сушіння у щільному фільтрувочому шарі сировини з початковим вологовмістом  $U_h \leq 1...1,2$  кг/кг кінетичні залежності

визначаються емпіричною формулою

$$U = U_p + (U_0 - U_p) \exp(-\sigma \rho^{-0,3} V^{0,52} t^{1,8}) \tau, \quad (20)$$

що дійсна при  $V = 0,1 \dots 0,5$  м/с;  $t_c = 19 \dots 90^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 20 \dots 165 \text{ кг/м}^3$ .

Експериментальні дані по теплообміну листостеблових матеріалів у процесі сушіння апроксимовані рівнянням:

$$Nu = A Re^h Pr^m, \quad (21)$$

Значення коефіцієнтів для стеблової частини:  $A = 0,638; h = 0,428; m = 0,33$ , для листяної -  $A = 0,14; h = 0,4; m = 0,33$ .

#### IV. Підвищення технологічної та енергетичної ефективності сушіння в установках безперервної дії.

Розроблені раціональні способи підвищення ефективності сушіння подрібненої сировини та обґрунтовані параметри засобів утилізації теплоти відпрацьованих газів у високотемпературних пневмобарабаних сушарках дозволяють не тільки підвищити ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів, але й забезпечити технологічний ефект - підвищення продуктивності сушарок та якості готового продукту.

Аналіз процесів сушіння листостеблових матеріалів у обертальних барабанах (для виробництва трав'яного борошна та різки), з використанням рециркуляції частини відпрацьованого сушильного агента, проводився з оцінкою впливу кратності рециркуляції теплоносія, ступеня попереднього подрібнення сировини та її початкової вологості на енергетичні та технологічні (продуктивність обладнання, рівномірність сушки, втрати каротину тощо) показники.

Апроксимація експериментальних даних по розподілу вологовмісту матеріалу (трави) вздовж сушильного барабана виразом (18) із заміною  $\tau \rightarrow x = G_0 \tau_0 \sigma / G_m C_m$  при розв'язанні системи (7) дає можливість отримати рівняння для визначення розподілу температур теплоносія та матеріалу по довжині барабана:

$$t = t_0 - B_1 - \frac{\theta}{D} (1 - e^{-dx}) + (B_1 + B_2 x) e^{-px}, \quad (22)$$

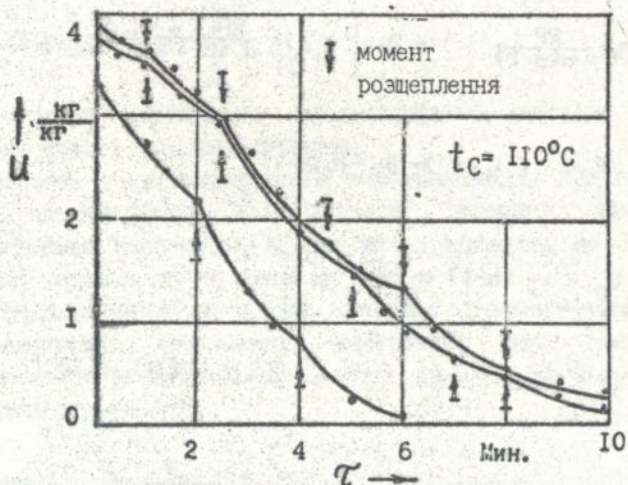


Рис. 5. Кінетика сушіння, суміщеного з подрібненням.

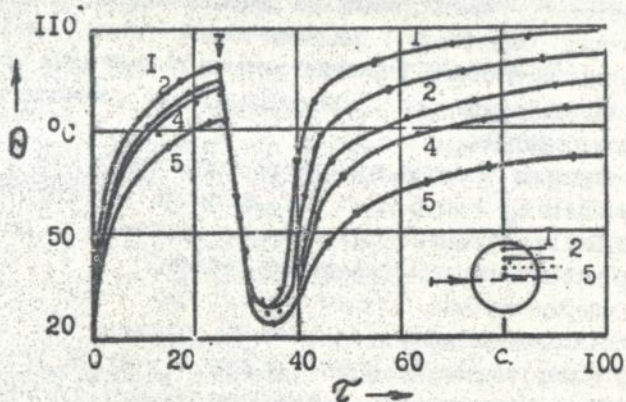


Рис. 6. Температурне поле частинки при її розщепленні.

$$\theta = t_0 - B_1 - n \left[ D^{-1} - (D^{-1} - \frac{R}{\alpha(a-1)}) e^{-Dn} \right] + \left\{ B_1 \left( 1 - \frac{RP}{\alpha(a-1)} \right) + B_2 \left[ x \left( 1 - \frac{RP}{\alpha(a-1)} \right) + \frac{R}{\alpha(a-1)} \right] \right\} e^{-Pn} \quad (23)$$

$$n = \frac{\alpha(a-1)}{k} (t_0 - \theta_0) + B_2 - B_1 D;$$

$$B_1 = U_0 \frac{G_0 \Gamma}{Lc} (a-1) \alpha \frac{p-D}{(p-D)^2};$$

$$B_2 = U_0 \frac{G_0 \Gamma}{Lc} \frac{1}{p-D}; \quad D = \frac{(Lc + GmCm) \alpha (a-1)}{Lc}.$$

Для врахування впливу кратності рециркуляції використовувались залежності  $\alpha_g(X)$ ,  $N_1(X)$  і  $C_p(X)$ .

За допомогою одержаних рівнянь визначена енергетична ефективність застосування рециркуляції, попереднього подрібнення матеріалу та зменшення його вологовмісту; встановлені оптимальні значення ступеня подрібнення матеріалу та максимальної кратності рециркуляції, що зменшують витрати енергії на сушіння.

Повернення частини відпрацьованого теплоносія з кратністю рециркуляції  $K_p \geq 1,5$  дозволяє зменшити витрати теплоти на 10...13,5% при сушінні свіжоскошеної сировини та на 18...21% при сушінні поперечно зневоднених рослин.

Експериментально встановлено, що при застосуванні теплоносія збільшеного вологовмісту підвищується температура нагріву матеріалу за лінійним законом:  $\bar{\theta}_p = \bar{\theta} + 5K_p$ . Враховуючи, що головним технологічним параметром процесу сушіння рослин є допустима температура нагріву, то є, що остання величина є функцією часу  $\bar{\theta} = f(\tau)$ , теоретично визначено значення максимально припустимої температури теплоносія на вході в барабан:

$$t_{m-x} = \left\{ 12,3 \cdot x_2 \ln \alpha \left( \sum_{i=1}^{n-1} x_i \right)^{-1} \right\}^{1/\gamma} \left\{ D^{-1} (x_2 - A) \frac{\alpha'}{R} \theta_0 - B_2 - \right. \\ \left. - B_1 \rho \right\} + B_1 x_2^{-1} \left[ B_1 \left( 1 - \frac{R \rho}{\alpha'} \right) + \frac{B_2 R}{\alpha'} \right] (1 - e^{-D x_2}) \quad (24)$$

$$x \left[ x_2 \left( 1 - \frac{\alpha'}{R D} \right) \frac{\alpha' A}{D} \right]^{-1}, \text{ де } A = D^{-1} - \frac{R}{\alpha'}, \alpha' = \alpha (a-1),$$

яка забезпечує максимальну продуктивність сушарки при збереженні якості вихідної сировини.

Показано, що інтенсифікація тепломасообміну при сушінні в сушарках безперервної дії дозволяє зменшити температуру відпрацьованого теплоносія  $t_2$  та викид теплоти, що обумовлює зменшення питомих витрат енергії.

Експериментально на діючих сушарках отримано залежність між вологістю висушеного матеріалу та температурою відпрацьованого теплоносія для різних способів та режимів сушіння в обортових барабанах:

$$\alpha_2 = \alpha_2 - b_2 t_2 \quad (25)$$

де  $\alpha_2 = 49,15$ ,  $b_2 = 0,317$  - при сушінні без рециркуляції;

$\alpha_2 = 43,98$ ,  $b_2 = 0,29$  - при сушінні з рециркуляцією;

$\alpha_2 = 30,7$ ,  $b_2 = 0,205$  - при суміщенні сушіння та подрібнення;

$\alpha_2 = 36,8$ ,  $b_2 = 0,263$  - при сушінні тільки листя.

Показано, що ефективність рециркуляції найкраще проявляється у двостадійному процесі (комбінована сушарка), коли відпрацьований теплоносій подається в перший ступінь агрегату в зону подрібнення, гальмуючи процес окислення каротину. При цьому продуктивність обладнання підвищується на 20...28%, а питомі витрати теплоти зникають від 3,6 до 2,9...3. МДж/кг.

В роботі проведено порівняльний аналіз варіантів використання засобів утилізації відпрацьованої теплоти сушарок (схеми на рис. 7). Показано, що максимальна ефективність (зниження витрат теплоти до 40%) сушіння рослинної сировини з утилізацією теплоти досягається у двостадійних процесах: високотемпературне зневоднення на першій стадії до вологості

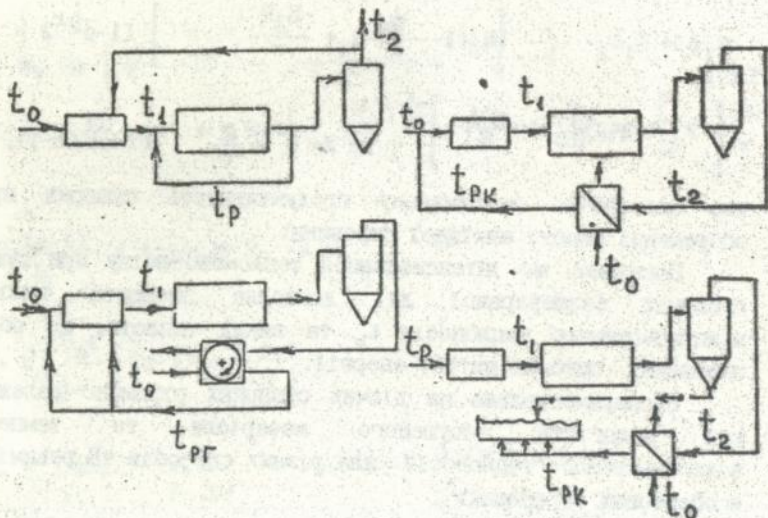


Рис. 7. Схеми використання засобів утилізації теплоти в сушарках

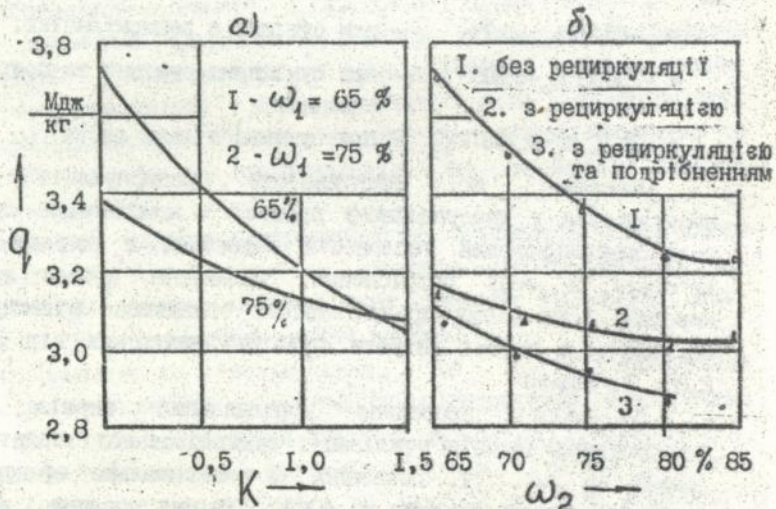


Рис. 8. Залежність питомої витрати енергії на сушіння:  
 а) від кратності рециркуляції;  
 б) від вологості сировини.

30...35: та подальше досушування у нерухомому шарі на місці зберігання готового продукту.

Для підвищення ефективності утилізації теплоти сушарок розроблена нова конструкція регенеративного утилізатора з дисковою обертальною насадкою, параметри якого визначені розв'язанням рівнянь теплового балансу і теплообміну між двома теплоносіями та обертальною насадкою. Температура теплоносія, що подається у сушарку з регенератора визначається:

$$t_{B2} = t_0 + (t_r - t_0) \frac{W_1(1 - e^{-A_1})(1 - e^{-A_2})}{W_3(1 - R_1 e^{-A_1})(1 - e^{-A_2}) + W_1(1 - e^{-A_1})(1 - R_2)}, \quad (26)$$

$$\text{де } A_1 = \frac{\alpha_r}{W_1} (1 - R_1) F; \quad A_2 = \frac{\alpha_B}{W_3} (1 - R_2) F; \quad R_1 = \frac{W_1}{W_2};$$

$$R_2 = \frac{W_3}{W_2}; \quad W_1 = C_r \cdot L_r; \quad W_3 = C_B \cdot L_B; \quad W_2 = C_p \omega \delta r_0^2 n \cdot 0,5.$$

Кількість теплоносія, що рециркулює в регенераторі, з врахуванням товщини пограничного шару за Шліхтингом, визначається формулою:

$$L_p = \rho_b \omega r_0^3 0,526 Re^{-0,2} n. \quad (27)$$

За формулами (26) і (27) та на основі натурних експериментів визначені раціональні параметри утилізатора. Засzczędження енергії при застосуванні регенератора для сушіння в обертовних барабанах становить 13...16%.

#### V. Інтенсифікація сушіння та зниження енергоспоживання в установках періодичної дії

Розглянуто та проаналізовано особливості процесу сушіння листостеблових матеріалів у нерухомому шарі фільтруванням атмосферного та підігрітого повітря відповідно задач зниження експозиції сушіння та енергоємності процесу.

Показано, що в періодичному режимі найбільш енергоекономним є повільний процес сушіння, але, виходячи з технологічних вимог, процес зневоднення необхідно максимально інтенсифікувати, щоб запобігти псуванню висушеної сировини. Усунення цього протиріччя може бути забезпечене раціональною структурою режимів проведення процесу сушіння, що реалізує оптимальний

зв'язок між вологопоглинальною можливістю повітря та вологовіддавальною спроможністю матеріалу.

Аналіз витрат енергії на підігрівання повітря та його транспортування крізь шар рослинної сировини, які визначаються рівнянням:

$$Q = \frac{L'}{G_0(1-\Gamma(\tau))} (\rho_B C_B \Delta t \cdot \eta_n^{-1} + \Delta P (L, h) \eta_B^{-1}) \cdot a \cdot \tau_B, \quad (28)$$

де  $\Gamma(\tau)$  - втрати поживних речовин.

виявив можливість зменшення питомої енергоємності одержуваного продукту при скороченні часу вентилявання (сушіння) шару матеріалу.

Тривалість сушіння, що визначається рівнянням кінетики сушіння (20) з врахуванням впливу теплоти самоігрівання, який кількісно оцінюється введеним коефіцієнтом  $\nu^1 = a_2 U - b_2$ , може бути визначена розв'язанням наближеного рівняння:

$$-\frac{dU}{dt} = -\frac{K(t, U)}{1 - a_2 U + b_2} (U - U_p), \quad (29)$$

де  $a = 0,52, b = 0,27$ .

Але загальний час зниження вологості матеріалу до величини  $U_k$  (експозиція кондиціонування), який складається з часу вентилявання та суми часу технологічних пауз (коли  $U_t \leq U_p$ )

$$\tau_k = \tau_B + \sum_{i=1}^{i=n} \tau_{oi}, \quad (30)$$

не повинен перевищувати терміну стійкого зберігання матеріалу, який є функцією температури і визначається емпіричним рівнянням

$$\tau_k \leq a_3 (U_0) (t_0 + \Delta t) m_3(U) \quad (31)$$

Вводячи поняття коефіцієнта ефективності періодичного сушіння, який визначається співвідношенням загального часу роботи сушильної установки і тривалості технологічних пауз:

$$K_B = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \tau_B}{\sum_{i=1}^{i=n} \tau_{oi}}, \quad (32)$$

отримано рівняння, що визначає експозицію кондиціонування як функцію часу роботи сушильної установки:

$$\tau_k = (1 + K_B^{-1}) \tau_B. \quad (33)$$

Розв'язання рівняння (29) з врахуванням (31) і (33) дає можливість отримати значення максимально припустимого часу

сушіння рослинної сировини

$$\tau_k \approx \frac{1 - K_B^{-1}}{a_0 t^m L^n \rho^p} \left[ \ln \frac{U_0 - U_p}{U_k - U_p} (a_2 U_p - 3,7) - a_2 (U_0 - U_k) \right] \quad (4)$$

тобто умову, виконання якої забезпечує стійке зберігання продукту у процесі його сушіння.

В роботі на основі аналізу багаторічних кліматичних даних для різних регіонів України визначені значення величини  $K_B$ .

Аналізом методів прискорення процесу сушіння за їх енергетичною ефективністю встановлено, що на початковій стадії процесу ( $U_t \geq 0,33 \dots 0,23$  кг/кг) інтенсифікувати вологовидалення з рослинної сировини маси доцільніше підвищенням питомої витрати атмосферного повітря  $L/G_0$ . Однак, при зменшенні вологовмісту сировини нижче за  $U=0,33$  кг/кг збільшення швидкості фільтрації повітря вже практично не впливає на швидкість сушіння і тому доцільніше зменшити витрати повітря до значення, яке забезпечує використання звілненої потужності вентиляційної установки для підігрівання повітря на величину

$$\Delta t = N_B (1 - \eta_B) / \rho L c_p, \quad (35)$$

яка є достатньою для зниження вологості повітря нижче рівноважного значення. Реально досягнена ступінь підігріву при дреселуванні вентилятора  $\Delta t = 2 \dots 4,5^\circ \text{C}$ .

В роботі показано, що одним з методів підвищення ефективності сушіння без підвищення встановленої потужності сушильно-вентиляційного блока є використання акумуляційного підігріву повітря за рахунок енергії, накопиченої у періоди технологічних пауз.

При використанні теплових акумуляторів з рідинним теплоносієм динаміка нагрівання сушильного агента теплотою, акумульованою рідиною місткістю  $G$ , визначається співвідношенням:

$$\Delta t = A ( \theta_{\text{max}} - t_{Bx} ) \exp (-T' \tau_n) \quad (36)$$

де  $A = K_f ( K_f + L c_p ) G^{\beta_i}$ ,  $T' = A L c_p / CG$ .

Аналізом рівняння (36) разом з рівнянням кінетики сушіння рослинної сировини у шарі обґрунтовано регламенти проведення "нагрівання-охолодження" теплоакumuлюючої місткості та

Визначені раціональні режими, що забезпечують зниження питомих енерговитрат.

В роботі проаналізовано розподіл потоків повітря, що фільтрується крізь об'єм висушувальної сировини при різних конструкціях повітророзподільчої системи. Запропоновані способи підвищення рівномірності сушіння в стаціонарних сховищах циклічно-реверсивним вмиканням вентиляційних установок.

#### Використання сонячної енергії для інтенсифікації сушіння рослинної сировини в сушарках періодичної дії

На основі узагальнення досвіду використання сонячної енергії для сушіння **розроблена класифікація** геліоповітропідігрівальників для сушіння рослинної сировини у великих об'ємах (30...200 т), які обумовлюють специфічні вимоги до сонячних колекторів.

Використовуючи спільний методичний підхід, сформульована і узагальнена математична модель площинного геліоколектора у вигляді системи рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} I(\alpha)\tau F &= C_n M_n \frac{dT_n}{dt} + \alpha_B f_n (T_n - T_1) + K_n f_n (T_n - T_2) + \\ &+ C_0 \epsilon_{np} \varphi' f_n (T_n^4 - T_{02}^4) 10^{-8} + C_0 \epsilon_{np2} \varphi'' f_n (T_n^4 - T_{01}^4) 10^{-8}; \\ \alpha_B f_n (T_n - T_1) &= C_1 \rho_1 V k_1 \frac{dT_1}{dt} + C_1 G_1 L \frac{dT_1}{dx} + f_n \alpha_B (T_1 - T_{01}); \\ \alpha_B f_n (T_1 - T_{01}) &= C_{01} M_{01} \frac{dT_{01}}{dt} + \alpha_{n1} f_1 (T_{01} T_n) + C_0 \epsilon_{np} f_1 (T_{01}^4 - T_{nB}^4) 10^{-8}; \\ K_n f_n (T_n - T_2) &= C_2 \rho_2 V k_2 \frac{dT_2}{dt} + C_2 G_2 L \frac{dT_2}{dx} + \alpha_B f_2 (T_2 - T_{02}); \\ \alpha_B f_2 (T_2 - T_{02}) &+ C_0 \epsilon_{np} \varphi'' f_n (T_n^4 - T_{02}^4) 10^{-8} = C_{02} M_{02} \frac{dT_{02}}{dt} + \\ &+ K_0 f_2 (T_{02} - T_n); \\ K_0 f_2 (T_{02} - T_n) &= K_n (T_n - T_n) f_n. \end{aligned} \right. \quad (37)$$

Для одноконтурних геліопідігрівників, що мають прозоре покриття

(або без нього), за сталого режиму ( $I(\tau)=\text{const}, T_{\text{п}}(\tau)=\text{const}$ ) одержане рівняння розподілу температури теплоносія по довжині каналу геліоколектора

$$T(X) = \alpha^{-1} \left\{ I(\alpha\tau)FK_1(1-e^{-X/T'}) + T_{\text{н}} \left[ K_2 - (K_2 - \alpha) e^{-X/T'} \right] \right\} \quad (38)$$

та функціональні залежності ступеня підігріву теплоносія

$$\Delta T = \left[ K_1 I(\alpha\tau)F + (K_2 - \alpha) T_{\text{н}} \right] (1 - e^{-X/T'}) \alpha^{-1} \quad (39)$$

і коефіцієнта ефективності (теплого ККД) геліоколектора

$$\eta = (G_B C_B / \alpha) \left[ K_1 + (K_2 - \alpha) / T_{\text{н}} F \right] (1 - e^{-X/T'}) \quad (40)$$

від режимних та конструктивних параметрів геліоперетворювачів.

Для колектора з захисним прозорим покриттям коефіцієнти рівнянь (38)-(40) визначаються співвідношеннями:

$$K_1 = \alpha_B f_{02} \left[ \alpha_{\lambda} f_{01} + (\alpha_B + k_{01}) f_{01} + \alpha_{\lambda} f_{02} \right] Z_1^{-1}; \quad T' = 1 / G_B C_B \alpha^{-1};$$

$$\alpha = Z_1^{-1} \left[ \alpha_B (f_{01} + f_{02}) Z_1 - \alpha_B f_{01} Z_3 - \alpha_B f_{02} Z_5 \right]$$

$$K_2 = \alpha_B \left\{ f_{01} \left[ (\alpha_B + 2\alpha_{\lambda} + K_{02}) f_{01} f_{01} K_{01} + \alpha_{\lambda} f_{02}^2 (\alpha_{\lambda} + K_{02}) \right] + \right. \\ \left. + f_{02}^2 \left[ \alpha_{\lambda} K_{01} f_{01} + (\alpha_{\lambda} + K_{02}) (\alpha_{\lambda} f_{02} + \alpha_B f_{01} + K_{01} f_{01}) \right] \right\} Z_1^{-1};$$

$$Z_1 = (\alpha_B + \alpha_{\lambda} Z + K_{02}) (\alpha_B f_{01} + \alpha_{\lambda} f_{02} + K_{01} f_{01}) f_{02} \alpha_{\lambda}^2 f_{02}^2$$

$$Z_3 = (\alpha_B + 2\alpha_{\lambda} + K_{02}) \alpha_B f_{01} f_{02} + f_{02}^2 \alpha_B \alpha_{\lambda};$$

$$Z_5 = (\alpha_B f_{01} + K_{01} f_{01} + \alpha_{\lambda} f_{02}) \alpha_B f_{01} + \alpha_B \alpha_{\lambda} f_{01} f_{02}.$$

В роботі наведені дані теоретичного аналізу (дані моделювання) режимів та параметрів конструкції геліоколекторів для підігрівання повітря, які свідчать, що підвищення теплової ефективності геліоперетворювачів можна досягти збільшенням питомих витрат повітря в каналах та збільшенням відносної площі

поглинальної поверхні  $f_1 = f_{oc} / f_{\Gamma}$

При узагальненні результатів моделювання та порівнянні їх даними експериментів критеріальне рівняння конвективного теплообміну у геліопідігрівниках відкориговано у вигляді:

$$Nu = \alpha' f_1^n \cdot Re^{0,506 f_1^3}, \quad (41)$$

де  $\alpha' = 0,174$ ,  $n = 11,5$  при  $0,4 \leq d_e \leq 0,5$ ;  $1 \leq f_1 \leq 1,6$ .

Результати розв'язання системи (37) з врахуванням стаціонарності досліджуваних процесів відносно  $T_{B1}$  і  $T_{B2}$  для двоканального геліоповітропідігрівника наведені на рис. 9 разом з експериментальними даними (штрихова лінія), які підтверджують адекватність розроблених моделей та реальних процесів.

Теоретично і експериментально підтверджена ефективність використання двоканальних сонячних колекторів типу "труба в трубі" для сушарок періодичної дії.

Для інтенсифікації теплообміну у внутрішньому каналі запропоновано використовувати петлеві та спіральні турбулізатори з еластичного матеріалу.

Реалізація принципу збільшення відносної поверхні поглинальної оболонки знайшла відображення при секціюванні внутрішньої оболонки, яка виконується у вигляді кількох (оптимальна кількість дорівнює трьом) циліндричних оболонок, розташованих у діаметральній площині захисної оболонки (рис.10).

Проведені також експериментальні дослідження і обґрунтовані параметри геліоколекторів з гнучкими оболонками.

Математична обробка даних експериментальних досліджень розроблених конструкцій геліоколекторів дозволила узагальнити основні залежності  $\eta(L)$ ,  $\Delta T(L)$  та  $\Delta T(\eta)$  рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \eta(L) &= \alpha_0 L^{b_0} \\ \Delta T(L) &= \alpha_3 \exp(-b_3 L) \\ \eta(\Delta T) &= \alpha_r \exp(-b_r \Delta T) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} L &= 50 - 250 \text{ м}^3/\text{год} \cdot \text{м}^2, \\ \Delta T &= 4 - 28^\circ\text{C}, \\ \text{при } I &= 500 - 960 \text{ Вт}/\text{м}^2. \end{aligned} \quad (42)$$

Значення коефіцієнтів рівнянь (42) наведені нижче у таблиці.

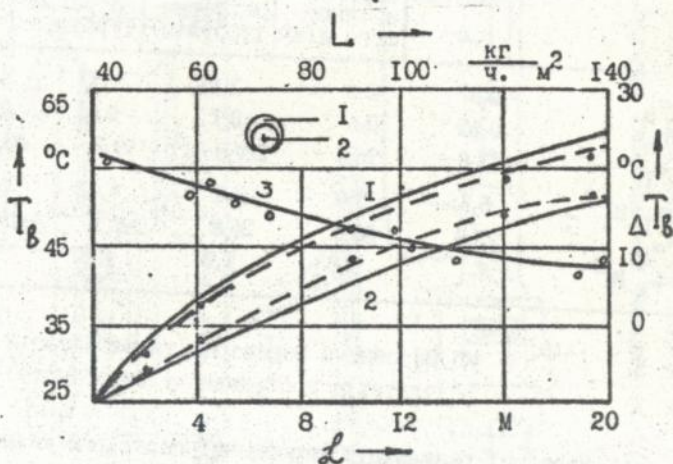


Рис. 9. Розподіл температури повітря по довжині двоканального геліоколектора (1,2), та залежність ступеня підігріву від витрат повітря (3).

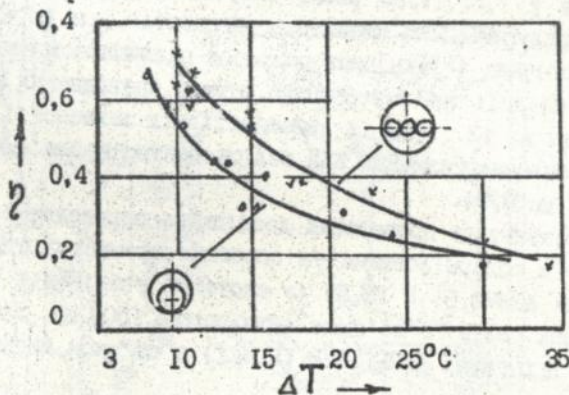


Рис. 10. Залежність ККД геліоколекторів від ступеня підігріву повітря.

## Значення коефіцієнтів у формулах

Позначення	Конструкція поглинаючої поверхні					
	округла	округла збільшеного діам	округла з петлевим турбуліз.	округ.зі спіральн. турбуліз.	площинна	секційована
$a_0$	2,07	2,6	2,15	1,55	3,12	3,15
$b_0$	0,65	0,6	0,7	0,81	0,54	0,6
$a_1$	73,8	96,4	129,3	99,7	68,5	114,8
$b_1 \cdot 10^2$	6,7	5,9	7,2	6,42	6,2	5,4
$a_3$	22,8	28,6	26,8	26,9	26,8	32,7
$b_3 \cdot 10^3$	9	9,5	7,9	8,8	9,95	9

ВП.Виробнича перевірка та реалізація результатів досліджень у виробництві

Наведені результати виробничої перевірки технологічних операцій, процесів сушіння та випробувань сушильного і допоміжного обладнання різного рівня (від відомчих до приймальних). Використання отриманих результатів дозволило зменшити тривалість сушіння трав у 1,5...1,65 рази, скоротити витрати енергії на 25...45%. Продуктивність сушильних агрегатів при впровадженні нових технологічних і технічних розробок підвищилась на 25...100%, витрати енергії на виробництво штучно зневоднених кормів із трав зменшені на 12...13% (в залежності від технології сушіння).

Теплоенергетичний ККД геліоколекторів для сушарок підвищено з 0,52 до 0,74.

Результати проведених досліджень впроваджені:

- в модернізованих та освоєних промисловістю сушильних агрегатах АЕМ-0,65 Р (Г,Ж) (з системою утилізації теплоти відпрацьованих газів) з об'ємом виробництва 1500 шт. на рік та у сушильних агрегатах АЕМ-1,5 Р (Г,Ж,Т) з об'ємом виробництва 750 шт. на рік;

- в розроблених, випробуваних та рекомендованих до серійного виробництва комбінованих агрегатах АЕМ-0,65 РТ з сушаркою-подрібнювачем;

- в розроблених, випробуваних та рекомендованих до виробництва пневмоаресаних агрегатах АЕМ-0,85 з системою утилізації відпрацьованої теплоти;

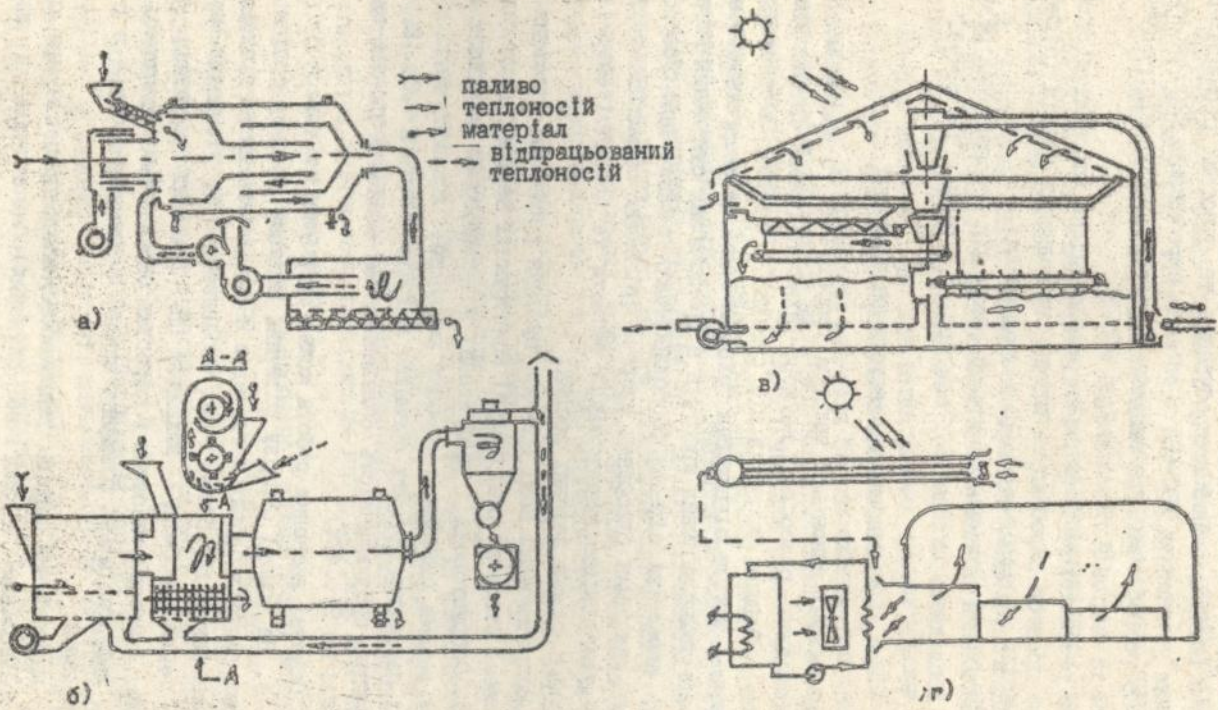


Рис. II. Схеми сушильних установок:

- а) комбiнований сушильний агрегат (АВМ-0,65РТ);
- в) баштова геліосушарка ВМС-20;
- б) пневмобарабанний агрегат АВМ-0,85;
- г) установка досушування сіна.

- в комплектах сушильно-вентиляційного обладнання БЕА-Т-30 з теплоакумуючим пристроєм ;

- в модернізованих випробуваних та освоєних промисловістю сушильних установках УВС-16А з об'ємом виробництва 2200 шт./рік.

- в розроблених та випробуваних геліоповітропідігрівниках ПСК-200 та баштовій геліосушарці МЕС-20.

За результатами досліджень розроблені та впроваджені технологічні процеси виробництва штучно зневоднених кормів (білково-вітамінного борошна, сіна, трав'яної різки).

Загальний річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень складає 6,1 млн.крб. ( в цінах 1990 року).

### Основні результати та висновки

На основі виконаних автором теоретичних та експериментальних досліджень розроблені науково-технічні основи інтенсифікації тепломасообмінних процесів при сушінні рослинної листостеблової сировини і методи підвищення технологічної та енергетичної ефективності технологічних процесів в промислових сушильних установках та агрегатах сільськогосподарського призначення. Розроблені основні напрямки створення енергозберігаючих сушильних технологій з утилізацією використаної теплоти та сонячної енергії для переробки врожаю зелених рослин.

Запропоновані нові способи сушіння рослинної сировини і на їх основі створені оригінальні конструкції перспективного обладнання. Обґрунтовані і реалізовані у промислових агрегатах ефективні режими сушіння і обробки рослинної сировини та конструктивні параметри робочих органів, які дозволяють в 1,3...2,1 рази підвищити продуктивність обладнання та зменшити питомі витрати енергії на 9...42%.

Основні висновки роботи можна сформулювати так:

1. На основі аналізу фізичних моделей процесу сушіння рослинних листостеблових матеріалів з використанням не враховуваних раніше факторів, біологічних особливостей та уточнених механізмів тепломасообміну, виходячи із сучасних досягнень теорії тепло- і масоперенесення в пористих середовищах, одержано:

диференціальні рівняння тепло- і масоперенесення в рослинних матеріалах;

математичну модель тепломасообмінних процесів при сушінні листостеблових (біологічно активних) матеріалів в щільному

фільтруючому шарі, в якій враховано полідисперсність, анізотропію щільності та інтенсивності тепловиділень сировини;

математичну модель процесу сушіння в пневмобарабаних сушарках безперервної дії;

математичну модель процесу сушіння з одночасним подрібненням.

Розроблено енергозберігаючі методи інтенсифікації сушіння рослинної сировини.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено метод інтенсифікації тепломасообміну шляхом суміщення процесів сушіння та подрібнення матеріалу.

Вперше виявлено, що при інтенсивному конвективному підведенні теплоти інтенсифікацію внутрішнього переносу можна здійснити циклічним збільшенням величини та оновленням напрямку градієнта температури шляхом малоенергомісткого процесу механічного подрібнення (розщеплення) стеблової частини рослин у середовищі високих ( $140 \dots 400^\circ\text{C}$ ) температур. При цьому охолодження новоутвореної поверхні призводить до зниження середньоінтегральної температури частинок матеріалу та різкого підвищення градієнта температури. Встановлено, що при підвищенні початкової (відносно моменту розщеплення) температури нагріву інтенсивність наступного вологовидалення та ступінь зниження температури матеріалу зростає. Це дає можливість ст. білізувати температуру матеріалу на максимально допустимому рівні ( $70 \dots 80^\circ\text{C}$ ) при його взаємодії з високотемпературним теплоносієм.

При малоінтенсивному підведенні теплоти до матеріалу (обмежений температурний рівень процесу) одночасна механічна та електрична обробка рослин інтенсифікує процеси вологовидалення еквівалентно підвищенню температури матеріалу, але при менших у  $8 \dots 10$  разів витратах енергії.

3. На основі аналізу розробленої математичної моделі тепломасообмінних процесів при сушінні багатокomпонентної рослинної сировини у високому фільтрованому шарі встановлено, що ефективність вологовидалення визначається характером температурного поля в об'ємі шару.

Вперше встановлено, що фільтрування повітря у напрямку природного збільшення насипної щільності шару листостеблової сировини і підвищення інтенсивності виділення теплоти самозігрівання є найбільш ефективним способом сушіння, оскільки

перешкоджає утворенню туману при насиченні повітря та зменшує інтенсивність сорбційного зволоження компонентів шару, що мають вологовміст нижчий від рівноважного.

При фільтруванні повітря крізь шар його відсмоктуванням з боку найбільшої щільності шару інтенсивність сушіння можна збільшити на 15...20 % і виключити зволоження нижнього шару сировини.

4. Вперше, на прикладі сушіння рослинної сировини в обертових барабанах, встановлено визначальний вплив характеру розподілу швидкості руху матеріалу по довжині сушильного тракту на швидкість його сушіння і нагрівання. Використання змінної (у часі або просторі) швидкості руху матеріалу дозволяє надати процесу сушіння керований характер і виключити довільність у формуванні поздовжніх концентраційних і температурних полів та реалізувати раціональні режими сушіння, що забезпечує підвищення продуктивності сушарки у 1,2...1,4 рази.

5. Експериментальні дослідження дозволили розкрити нові закономірності процесу сушіння з одночасним подрібненням матеріалу. Встановити межі його ефективного використання.

Встановлено, що при суміщенні високотемпературного сушіння з подрібненням значно збільшується інтенсивність теплообміну: коефіцієнт теплообміну збільшується в 10 разів, досягаючи значення 1000...1200 Вт/м<sup>2</sup>К; вологонапруження сушильної камери збільшується до 500...800 кг/м<sup>2</sup>.год.

Запропоновано спосіб сушіння у двофазовому багатоступінчастому варіанті з використанням теплоти відтрацьованих газів при подрібненні матеріалу і щільності процесів подрібнення та зневоднення матеріалу в активних гідродинамічних режимах. Практична реалізація цього способу дозволила підвищити продуктивність промислових агрегатів на 20...28% при зниженні питомих витрат енергії на 9...15%.

6. Виявлені та узагальнені у вигляді математичних залежностей закономірності процесів зневоднення багатьох видів листостеблових матеріалів при сушінні різними способами: в завислому стані; в щільному фільтрованому шарі (при значенні насипної щільності від 60 до 180 кг/м<sup>3</sup>); у вихровому кільцевому шарі (при різному ступені подрібнення); при сушінні з одночасним подрібненням та після різних видів попередньої (електричної і механічної) обробки в широких інтервалах режимних параметрів:  $t_c = 15...120^\circ\text{C}$ ,  $V = 0,1...2,5 \text{ м/с}$ ;  $\phi = 10...85\%$ ;  $\psi = 10...300 \text{ г/кг}$ .

Одержані узагальнені модифіковані рівняння кінетики сушіння нагріву матеріалу та температурних кривих в інтервалі початкової вологості сировини 45...85% .

7. Експериментально доведено, що використання для сушіння пароповітряної суміші, яку одержують додаванням в сушильний агент частини відпрацьованих газів (при температурі відпрацьованого теплоносія  $100...150^{\circ}\text{C}$  та його вологовмісту  $180...300 \text{ г/кг}$ ) дозволяє, не зменшуючи (а для окремих видів сировини навіть збільшуючи) продуктивність сушарки, знизити питомі витрати енергії на  $9...23\%$ . При зниженні початкової вологості сировини ефективність рециркуляції відпрацьованих газів підвищується. Кратність рециркуляції, що практично реалізується у пневмобарабанных сушарках, складає  $0,65...0,7$ .

Подальше зниження витрат енергії на сушіння досягається використанням регенеративних теплообмінників (зниження енергоемності процесу на  $18...20\%$ ).

Одержано та апробовано аналітичні залежності для визначення параметрів обладнання утилізації викидної теплоти сушарок.

8. Показано, що мінімізація експозиції сушіння при змінних у часі параметрах сушильного агента та зниження енергетичних витрат в періодичному режимі досягається як інтенсифікацією (безпосередньо) вологовидалення, так і скороченням тривалості технологічних пауз (невентильовані періоди). При дослідженні реальних процесів це кількісно оцінюється введеним автором коефіцієнтом ефективності періодичної сушки.

Встановлено, що при вологості сировини  $0,3...0,33 \text{ кг/кг}$  і повітря понад  $65...75\%$  інтенсифікувати сушіння доцільно збільшенням питомої витрати повітря. При відхиленні параметрів повітря та матеріалу від зазначеного значення необхідне підігрівання повітря, що йде на сушіння. Обґрунтовано спосіб сушіння при підігріванні повітря з одночасним зниженням його витрат до  $0,3...0,35$  від нормованого значення, що дозволяє підвищити продуктивність сушарок періодичної дії в  $1,5...2,2$  рази та зменшити витрати енергії. Оцінено вплив параметрів процесу на його енергоемність. Розроблені способи керування процесом періодичного сушіння.

9. Визначено, що ефективність використання сонячної енергії для інтенсифікації сушіння рослинної сировини (в сферах  $50...200$  тонн) визначається як тепловий продуктивністю, так і способом теплозйому в каналах геліоколекторів сушарок.

На основі загального методичного підходу запропоновано узагальнену математичну модель (основних типів геліопідігрівників), використання якої дозволило виявити основні напрямки підвищення ефективності сонячних повітропідігрівників для сушарок.

Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено істотний вплив співвідношення поглинальної та загальної поверхні геліоколектора на енергетичну ефективність. При збільшенні цього співвідношення у 2 рази ККД колектора збільшується з 0,6 до 0,74.

Отримано критеріальне рівняння конвективного теплообміну у каналах при нагріванні зовнішньої оболонки сонячним випромінюванням, скоректоване до співвідношення поверхонь.

Виконана оптимізація конструктивних та режимних параметрів плівкових геліоповітропідігрівників для сушарок. Встановлено, що мінімізація часу періодичного сушіння рослинної сировини у шарі досягається при відповідному співвідношенні площі геліоколектора і витрат повітря на сушіння: при цьому раціональна кратність змішування підігрітого атмосферного повітря 0,7...0,75.

Досліджено методи інтенсифікації теплообміну в каналах з гнучкими оболонками та запропоновано нові типи поглинаючих елементів.

10. На основі результатів натурних випробувань доведено високу ефективність запропонованих способів інтенсифікації теплообміну та підвищення теплопродуктивності і ККД безкаркасних геліонагрівачів. Встановлено, що періодичне ступінчасте або "гвинтове" зменшення діаметра поглинальної оболонки до величини  $(0,84...0,90)d$  з кроком  $(1,0...1,5)d$  забезпечує підвищення ККД при мінімальному підвищенні аеродинамічного опору. Ефективність колектора при цьому підвищується у 1,5 рази.

Показано, що використання секціонування поглинальників сонячного випромінювання дозволяє створити плівкові геліоколектори з ефективністю, не нижчою 0,70.

Експериментально встановлені та узагальнені залежності для визначення ККД і ступеня підігрівання повітря в геліоколекторах запропонованих конструкцій.

11. Результати досліджень використані при створенні нових зразків сушильного обладнання (9 найменувань сушильних установок) рекомендовані до серійного виробництва або вже налагоджено серійне виробництво, при розробці і впровадженні трьох технологічних процесів і методичних рекомендацій для ефективного використання сушарок та допоміжного обладнання. Фактичний економічний ефект від впровадження розробок становить понад 6 млн. крб. (ціни 1990р.).

Основні положення дисертації опубліковані в таких працях:

1. Об электрических методах интенсификации технологических процессов в земледелии. Вопросы земледельческой механики. -М. 1976. С.4-6 (співаєт. Мартиненко І.І.).

2. Технологія приготування сіна активним вентиляванням. Механізація сільського господарства 1974 .N5 С.93-98 (співаєт. Данилевич С.Ю.).

3. Технология механизированного приготовления высококачественного сена. Техника в сельском хозяйстве 1974, N7 С.41-44 (співаєт. Данилевич С.Ю.).

4. Исследование сельскохозяйственных установок активного вентилирования с помощью электрического моделирования (співаєт. Мартиненко І.І.) Вестник сельскохозяйственной науки 1974, N9 с.88-92.

5. Автоматизация процесса сушки сена. Сб. Механизация и электрификация сельского хозяйства -К.. 1975 Вып.32 С.44-46

6 .Исследование температурных режимов при сушке сена. Сб. Механизация и электрификация сельского хозяйства 1975 Вып. .33 С.68-72

7. Технологічний процес механізованого приготування сіна активним вентиляванням та сінажу. К.-"Урожай" 1975 (співаєт. Тудель М.В., Данилевич С.Ю., Пйонтик Л.Л. та інш.) С.25.

8. Интенсификация сушки зеленых кормов предварительной электрообработкой . Сб. Пути повышения эффективности и рационального использования электроэнергии и тепла в сельском хозяйстве.- Запорожье, 1977. С.23-24 (співаєт. Мартиненко І.І., Беженар Г.В.)

9. Дослідження теплофізичних та механічних властивостей рослинної сировини. Вісник сільськогосподарської науки. 1977, N9 С.24-26. (співаєт Ляшук М.Ф.).

10. Совмещение операций сушки и измельчения при обезвоживании высоковлажного растительного сырья. Сб. Разработка и внедрение высокоэффективных сушильных установок. -К. 1973 с.44-45 (співаєт. Ляшук М.Ф.). 11. Повышение производительности сушильных агрегатов для производства сухих кормов . Сб. Проблемы создания оборудования кормоцехов.-Вильнюс 1980 С.78-83 (співаєт. Шнюрівчюс Е.В.).

12. Интенсификация сушки трав. Механизация и электрификация сельского хозяйства . 1981 N1 С. 8-11 (співаєт. Шнюрівчюс Е.В., Ляшук М.Ф. та інш).

13. Влияние степени измельчения трав на экономичность сушильных агрегатов. Сб. Механизация и электрификация сельского хозяйства. -К. Урожай Вып. 51. С. 66-69
14. Направления совершенствования технологии высокотемпературной сушки. Сб. Проблемы разработки оборудования промышленного кормопроизводства. - Вильнюс 1981 с. 41-42 (співавт. Шнюрявічюс Е.В.).
15. Исследование влияния параметров на процесс сушки. Сб. Дальнейшее совершенствование теории технологии и техники сушки. -Киев 1981 с. 135-136. (співавт. Шнюрявічюс Е.В.).
16. Определение параметров комбинированных сушильных агрегатов. Сб. Научных трудов ВНИИЖИЕМАШ. -К. 1981 с. 52-56 (співавт. Шнюрявічюс Е.В.).
17. Исследование методов снижения расхода тепла на сушку в пневмобарабанных агрегатах. Сб. Механизация и электрификация сельского хозяйства. К. "Урожай" 1982 Вып. 53 С. 8-12 (співавт. Шнюрявічюс Е.В.).
18. Определение параметров комбинированных сушильных агрегатов. Сб. Исследование и конструирование машин для животноводства и кормопроизводства. К.- 1981 Вып. 6. С. 52-56 (співавт. Шнюрявічюс Е.В.).
19. К определению температуры материала в процессе сушки в пневмобарабанных агрегатах. Сб. Механизация и электрификация сельского хозяйства. -К. 1984, Вып. 59 С. 41-45. (співавт. Шнюрявічюс Е.В.).
20. Кинетика низкотемпературной сушки трав. Сб. Механизация и электрификация сельского хозяйства К. "Урожай" 1984 Вып. 60 с. 66-69 (співавт. Яроцький В.А.).
21. Совершенствование технологии и техники сушки кормовых продуктов. Сб. Совершенствование техники, технологии сушки сельскохозяйственных и пищевых продуктов в соответствии с продовольственной программой. -М. 1984 с. 10-11 (співавт. Шнюрявічюс Е.В.).
22. Методические рекомендации по заготовке сена и травяной резки. К. Минплодоовощ УССР с. 33. (співавт. Яроцький В.А., Рибарук Р.В., Заткей Н.Б. та інші).-1985.
23. Особенности использования агрегатов АЕМ-0,65Р. Техника в сельском хозяйстве". 1985 №7 с. 19...22. (співавт. Шнюрявічюс Е.В.).
24. К определению динамики сушки трав в плотном слое. Сб. Механизация и электрификация сельского хозяйства. К.- 1985. вып. 61. с. 58-61.

25. Использование регенеративных воздухоподогревателей в сушильных агрегатах АЕМ. Сб. Проблемы механизации сельскохозяйственного производства. - М. 1985 с. 56-57 (спив. авт. Шнорявичюс Е.В.).

26. Теплоэнергетическая эффективность средств утилизации вторичного тепла. с. 191-192 ( там же ).

27. Прогрессивные направления в развитии искусственной сушки трав. Сб. Интенсификация перестройки и внедрения новых технологий в кормопроизводстве. - Вильнюс 1986. с. 12-13 (спив. авт. Шнорявичюс Е.В., Бандинкас Ч.А.).

28. Разработка и внедрение технологии заготовки сухих кормов в зонах повышенной влажности. Сб. Интенсификация перестройки и внедрения новых технологий в кормопроизводстве. - Вильнюс 1986. С.12-13. (спив. авт. Изасечко М.И., Жудиба С.К.).

29. Искусственная сушка при заготовке кормов. Техника в сельском хозяйстве. 1987 №6 с. 14-16 (спив. авт. Шнорявичюс Е.В.).

30. Теплоэнергетический и технико-экономический анализ схем утилизации тепла отработанных газов сушильных агрегатов. Сб. "Механизация и электрификация сельского хозяйства" вып. 65. 1987. -К. "Урожай" С. 63-67. ( спив. авт. Даллакян Ж.А.).

31. Энергосберегающая технология сушки трав при производстве резки. Сб. Разработка прогрессивных способов сушки различных материалов и изделий на основе достижений теории тепло- и массообмена. -К. 1987 Вып. 2. С.67.

32. Економічна заготівля різки. Механізація сільського господарства. 1988, №6 С.18.

33. Энергосберегающие технологии сушки кормов. Сб. Энергосберегающие технологии производства, заготовки и хранения кормов. Винница. 1988 С.53-54.

34. Повышение эффективности гелионагревателей для сушки сельхозпродуктов. Сб. Энергосберегающее оборудование для АПК. М. 1990 С.32. (спив. авт. Шнорявичюс Е.В., Вількицький А.В.).

35. Повышение эффективности солнечных коллекторов для подогрева воздуха. Техника в сельском хозяйстве. 1991 №2 С.12-30.

36. Ефективне використання сонячних колекторів для сушіння сільгоспродуктів. Енергосберігаючі технології та технічні засоби с.77-78.

37. Повышение теплопроизводительности низкопотенциальных солнечных коллекторов  
Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1993 №1 С.15-17.

38. Оптимизация параметров солнечных воздухонагревателей. Техника в сельском хозяйстве, 1994 №1 С. 8-10.
39. А.с.584610 (СССР). Установка для сушки и измельчения комкующихся и волокнистых материалов (Б.И.Котов, Я.А.Кузьмич, Н.Ф.Ляшук) 1976. Бюл.№20.
40. А.с. 624079 (СССР). Способ сушки полидисперсных материалов во взвешенном состоянии (Б.И.Котов). 1978. Бюл. №34.
41. А.с. 666405 (СССР). Установка для сушки и измельчения термочувствительных материалов. (Б.И.Котов, Н.Ф.Ляшук, Е.И.Храпач и др.). 1979 Бюл.№21.
42. А.с. 769252 (СССР). Установка для сушки сыпучих материалов (Е.И.Храпач, Б.И.Котов., З.М.Кучинская и др.). 1980 Бюл. №37.
43. А.с. 820354 (СССР). Установка для одновременной сушки и измельчения материалов (Б.И.Котов, Э.В.Шнорявичюс, В.Н. Мумяга) 1980. Бюл.№27.
44. А.с. 745427 (СССР). Устройство для электрообработки растительного сырья перед сушкой И.И.Мартыненко, Б.И.Котов, П.В.Литвиненко и др) .1980. бюл.№28
45. А.с 877265 (СССР). Способ термообработки дисперсного материала (Б.И.Котов). 1981. Бюл.№40.
46. А.с. 869743 (СССР). Способ производства кормов из растительного материала (З.М.Кучинская, Э.В.Шнорявичюс, Б.И.Котов и др.) 1981. Бюл.№37.
47. А.с. 956941 (СССР). Сушильная установка (Б.И.Котов, Э.В.Шнорявичюс, В.Н.Мумяга и др.) 1982. Бюл.№33.
48. А.с. 1028312 (СССР). Агрегат для приготовления сухих кормов (Б.И.Котов, Э.В.Шнорявичюс, В.Н.Мумяга и др.) 1983. Бюл.№26.
49. А.с. 1101644 (СССР). Барабан для сушки сельхозпродуктов (Э.В.Шнорявичюс, Б.И.Котов, А.Ю.Мотекнас и др.). 1984. Бюл.№25.
50. А.с.1196638 (СССР). Барабанная сушилка для сыпучих материалов (Э.В.Шнорявичюс, Б.И.Котов, Ю.Л.Фрегер). 1985. Бюл.№45.
51. А.с.1213340 (СССР). Теплообменник (Э.В.Шнорявичюс, А.В.Вилькицкий, Б.И.Котов). 1986. Бюл.№7.
52. А.с. 1255834 (СССР). Сушильная установка (Б.И.Котов, Э.В.Шнорявичюс, Ч.А.Бандинская и др.). 1986. Бюл.№33.
53. А.с. 1323834 (СССР). Теплогенератор (Э.В.Шнорявичюс, А.П.С.Алешкявичюс, Б.И.Котов). 1987 Бюл. №26.

54. А.с. 1408173 (СССР). Барабанная сушилка (Э.В.Шняровичюс, Б.И.Котов, А-П.С.Алешкявичюс и др.) 1988. Бюл. N25.

55. А.с. 1516076 (СССР). Устройство для подготовки грубых кормов и хранения (Котов Б.И., И.В.Ивасечко, Э.В.Шняровичюс и др.) 1989. Бюл. N39.

56. А.с. 1517839 (СССР). Установка для сушки сельскохозяйственных продуктов активным вентилированием (Э.В.Шняровичюс, Б.И.Котов, Ч.А.Бандинскас и др.). 1989. Бюл. N 40

57. А.с. 1515010 (СССР). Отделитель материала (Э.В.Шняровичюс, Б.И.Котов, Я.М.Зубер и др.). 1990. Бюл. N30.

58. А.с. 1617281 (СССР). Способ контроля процесса сушки при активном вентилировании (Б.И.Котов, Э.В.Шняровичюс, Ч.А.Бандинскас)

59. А.с. 1643084 (СССР). Установка для дробления материала (Э.В.Шняровичюс, Б.И.Котов, Ч.А.Бандинскас и др.). 1991 Бюл. N15.

60. А.с. 1655349 (СССР). Способ сушки сельхозматериалов и устройство для его осуществления (С.А.Николаев, Ю.Л.Фрегер Б.И.Котов и др.). 1991. Бюл. N12.

61. А.с. 1721409 (СССР). Способ изготовления пленочного солнечного коллектора (Э.В.Шняровичюс, Б.И.Котов, А.В.Вилькицкий и др.) 1992. Бюл. N11.

#### Умовні позначення:

$t, \Psi, X$  - температура, вологість, вологовміст сушильного агента;  
 $P$  - тиск;  $U_{ж}, U_n$  - вологовміст і паровміст матеріалу в одиниці об'єму;  $\vartheta, U$  - температура та вологовміст матеріалу;  $\rho_0$  - щільність матеріалу;  $\rho_{п1} - \rho_n$  - об'ємна густина пари і повітря;  $m_0$  - пористість;  $D(\vartheta)$  - коефіцієнт проникності;  $K_0$  - проникність;  $\eta$  - в'язкість;  $C$  - питома теплоємність;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності;  $\gamma$  - питома теплота пароутворення;  $I$  - інтенсивність міжфазового масообміну;  $R$  - універсальна газова стала;  $V'$  - молярний об'єм;  $\vartheta$  - насиченість;  $\alpha$  - коефіцієнт теплообміну;  $d_{e, \delta}$  - еквівалентний діаметр, розмір частинок;  $G_c$  - маса сухого матеріалу;  $G_{b1} L$  - потужність біологічних тепловидлень.  $K_1 K_B$  - коефіцієнт сушіння;  $f_p$  - площа решітки;  $f$  - площа теплообміну;  $F$  - загальна площа;  $V$  - об'єм;  $\tau_0$  - питома поверхня матеріалу;  $\mu_i$  - відносна частка  $i$ -тої фракції;  $Z, Y, X$  - координати;  $N$  - швидкість сушіння  $N_b$  - потужність вентилятора;  $g_n$  - навантаження на один робочий орган подрібнювача;  $W_1 - W_3$  - водний еквівалент газу і повітря;  $\Delta P$  - втрати тиску в каналі або шарі сировини;  $r_0$  - радіус насадки;  $\tau$  - поточний час;  $H$  - висота шару сировини;  $\alpha^{1,1} - \alpha^{1,1}$  - коефіцієнти пропускання та відбивання;  $K_n$  - коефіцієнт теплопередачі;  $\alpha_\lambda$  - лі-

457643

неагизований коефіцієнт теплообміну випромінюванням;  $\epsilon_{\text{пр}}$  - відносний коефіцієнт випромінювання;

Індекси: п - пара; м - матеріал; ж - рідина;  $o_1$  - оболонка колектора; пг - поглинальна поверхня; в - повітря; к - колектор; нб - небо; н - зовнішнє; 0 - початкова, або гранична величина; с - сухе, с.а. - сушильний агент або сереловище; г - газ; А,В,С,Д,Н - сталі коефіцієнти.

457643

AB 30.582

**AB 30.582**