

Головний редактор
Б.В. Сторов, д.т.н., проф.
E-mail: bogdan@osaft.odessa.ua
Заступник головного редактора
Е.П. Жуковської, д.т.н., проф.

Редакційна колегія:

Б.В. Бурдонський, д.с.н., проф. (Одеса)
О.М. Васильченко (Київ)
О.І. Галонюк, д.т.н., проф. (Одеса)
Г.О. Глобенко, к.т.н. (Кіровоград)
В.Т. Гузавської, к.т.н. (Новоукраїнка)
Є.А. Дмитрук, д.т.н., проф. (Київ)
В.І. Дробот, д.т.н., проф. (Київ)
М.І. Звериков, д.с.н., проф. (Одеса)
Л.В. Капрельянц, д.т.н., проф. (Одеса)
Л.Н. Пилипенко, д.т.н., проф. (Одеса)
І.С. Крестников, д.б.н., проф. (Одеса)
І.М. Крижов (Київ)
В.О. Моргул, д.т.н., проф. (Одеса)
І.Т. Мерко, д.т.н., проф. (Одеса)
В.П. Нестров, д.т.н., проф. (Київ)
О.І. Шаповаленко, д.т.н., проф. (Київ)
А.С. Ревькін, д.с.н., проф. (Одеса)
В.І. Осипов, д.с.н., проф. (Одеса)
С.К. Харченко, д.с.н., проф. (Одеса)
І.М. Ришков, к.с.н. (Київ)
П.В. Осипов, д.с.н., доц. (Одеса)
Н.І. Пушкарєнко (Одеса)
Г.М. Станкевич, д.т.н., проф. (Одеса)
К.Г. Іоргачова, д.т.н., проф. (Одеса)
І.К. Чайка, к.т.н., доц. (Одеса)
А.І. Яковенко, к.т.н., доц. (Одеса)

**Відповідальний редактор,
комп'ютерний дизайн:**

А.В. Макаринська, к.т.н., доц.
т. 8(048) 712-41-13, 712-40-76
E-mail: makarins@osaft.odessa.ua

**Директор по маркетингу і
громадським зв'язкам:**
К.Б. Козак 8(048) 760-15-67
E-mail: combico_k@te.net.ua

Коректор англійських перекладів:
Л.Б. Зукіна, к.ф.н., доц.

Адреса редакції:

А-132, Одеська національна академія
харчових технологій,
112, вул. Канатна, м. Одеса, 65039
Тел.8 (048) 7124150, 7601567

За достовірність інформації відповідає автор
публікації. Матеріали друкуються мовою
оригіналу. Передрукування матеріалів журналу
дозволяється тільки за погодженням з редакцією.

Ціна за друком – 100 грн.

Підписано до друку рішенням вченої ради
ОНАХТ від 24.06.2009 р.
Формат 60 x 84/8. Папір офсетний.
Гарнітура TNK. Друк офсетний.
Тираж 1000 прим. Зам. № 238.
Надруковано ФОП Печова Н.М.

www.journal-zpk.com

**Підписний індекс
в каталозі Укрпошти 91963**
виходить в ліній кожного кварталу

Зернові продукти і комбікорми Зерновые продукты и комбикорма

Grain Products and Mixed Fodder's

ЯКІСТЬ * ВИРОБНИЦТВО * ВИКОРИСТАННЯ * ТЕХНОЛОГІЇ *
ОБЛАДНАННЯ * АВТОМАТИЗАЦІЯ * УПРАВЛІННЯ * ЕКОНОМІКА *

ЗМІСТ

ПРОФЕСІЙНІ НОВИНИ

Міжнародна конференція „Комбікорма-2009”.....	4
Мироновский хлебопродукт.....	5
Білявська Н.П. Вчені академії. Георгій Федорович Костюк.....	6
Білявська Н.П. Вчені академії. Мар Сергійович Дудкін.....	7

ЕКОНОМІКА, ОЦІНКИ І ПРОГНОЗИ

Савенко І.І. Формування зерновими складами ринку послуг із зберігання зерна.....	9
--	---

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ЯКІСТЬ

Черно Н.К., Крусір Г.В., Яшкіна В.В. Рослинні комплекси, які інгібують дію панкреатичної ліпази, та їх використання.....	13
Овсянникова Л.К., Сьдокімова Г.П., Черний В.О. Вплив умов зберігання на вміст алілової олії в насінні гірчиці.....	17
Грищенко Ф.В. Технологічні процеси в харчовій промисловості: аналіз стану міжнародної нормативної бази.....	19
Сторова А.В. Технологія виробництва функціональних продуктів харчування на основі зерна кукурудзи і рослинних добавок.....	22
Мардар М.Р., Кордзая Н.Р. Використання органолептичних методів аналізу при розробці нових сортів цільнозернового хліба.....	24
Селіванська І.А. Комплексна переробка соєвих бобів з одержанням сухого соєвого молока.....	27
Дідух І.А. Обґрунтування параметрів зберігання молочно-зернового геро-кефіру.....	30
Сторов Б.В., Кочетова А.А., Восцька О.С. та ін. Зміна сорбційних властивостей комбікормів для акваріумних риб в процесі екструзування та експандування.....	35
Урдік Р.М. Група компаній «Єдинство» - це розумні ціни, швидкість та чіткість розгляду питань, повний набір видів послуг.....	41

ПРОЦЕСИ, ОБЛАДНАННЯ І АВТОМАТИЗАЦІЯ

Гапонок І.І. Зменшення внутрішнього опору дифузії вологи.....	43
Остапчук М.В., Гапонок І.І., Гончарук А.А. Аналіз форм математичного опису процесів ВТО зерна.....	50

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОФЕСИОНАЛЬНЫЕ НОВОСТИ

Международная конференция „Комбикорма-2009”.....	4
Мироновский хлебопродукт.....	5
Белявская Н.П. Ученые академии. Георгий Федорович Костюк.....	6
Белявская Н.П. Ученые академии. Мар Сергеевич Дудкин.....	7

ЭКОНОМИКА, ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗЫ

Савенко И.И. Формирование зерновыми складами рынка услуг по хранению зерна.....	9
---	---

ТЕХНОЛОГИЯ И КАЧЕСТВО

Черно Н.К., Крусір Г.В., Яшкіна В.В. Растительные комплексы, ингибирующие действие панкреатической липазы, и их использование.....	13
Овсянникова Л.К., Сьдокімова Г.П., Черний В.О. Влияние условий хранения на содержание аллилового масла в семенах горчицы.....	17
Грищенко Ф.В. Технологические процессы в пищевой промышленности: анализ состояния международной нормативной базы.....	19
Сторова А.В. Технология производства функциональных продуктов питания на основе зерна кукурузы и растительных добавок.....	22
Мардар М.Р., Кордзая Н.Р. Использование органолептических методов анализа при разработке новых сортов цельнозернового хлеба.....	24
Селіванська І.А. Комплексная переработка соевых бобов с получением сухого соєвого молока.....	27
Дідух І.А. Обоснование параметров хранения молочно-зернового геро-кефира.....	30
Сторов Б.В., Кочетова А.А., Восцька Е.Е. и др. Изменение сорбционных свойств комбикормов для аквариумных рыб в процессе экструдирования и экспандирования.....	35
Урдік Р.М. Група компаній «Єдинство» - это разумные цены, быстрота и четкость рассмотрения вопросов, полный набор видов услуг.....	41

ПРОЦЕССЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Гапонок И.И. Снижение внутреннего сопротивления диффузии влаги.....	43
Остапчук М.В., Гапонок И.И., Гончарук А.А. Анализ формы математического описания процессов ВТО зерна.....	50

**ЗМЕНШЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ
ДИФУЗІЇ ВОЛОГИ**

Обґрунтовано та підтверджено гіпотезу щодо причини зростання енергії зневоднення капілярно-шпаруватих тіл при конвективному тепломасообміні; встановлено фактори впливу та способи зменшення додаткових витрат енергії зневоднення; дослідним шляхом отримано чисельну характеристику удосконалених способів тепломасообміну та наведено їх математичне описання.

Ключові слова: зерно, волога, капіляри, тепломасообмін, робочі гази, рушійний потенціал, енергія, аеродинамічний опір.

To be substantiated and confirmed the hypothesis of about an increase in the energy of the drying of capillary-porous bodies with convective drying, to be revealed the contributing factors and the methods of decreasing these additional expenditures of energy, is experimentally obtained the numerical characteristic of the modernized method of the convective drying and is given their mathematical description.

The keywords: grain, moisture, capillaries, working gases, the moving potential, energy, aerodynamic drag, heat, drying.

Відомо, що зі зменшенням вологовмісту зерна зростають енерговитрати на його сушіння [1, 2, 3, 6, 8]. За різними даними, ці додаткові витрати енергії сушіння зерна можуть кілька разів перевищувати енергію фазових перетворень вологи. додаткові витрати пов'язані із зростанням опору внутрішньої дифузії вологи в капілярах зернини [2, 3, 9]. Опір внутрішньої дифузії, або як його ще визначає М.І.Малін, опір випаровуванню вологи, як правило визначають за фактичними енерговитратами сушіння [7, 8]:

$$\Delta = (q_b - r_p) / r_p \quad (1)$$

де q_b – витрати теплоти на випаровування вологи для даного вологовмісту зерна, кДж/кг-вологи; r_p – розрахункове значення скритої теплоти пароутворення, кДж/кг-вологи.

М.Ф.Казанський, методом індикатору, та В.М.Казанський, за допомогою ізотермічного калориметру, дослідним шляхом встановили залежність приросту питомої теплоти випаровування вологи Δr від вологовмісту капілярно шпаруватого матеріалу [3, 6]. При визначенні показника Δr автори використовували відоме рівняння Гіббса-Гельмгольца:

$$\Delta I = \Delta F + T \cdot \Delta S, \quad (2)$$

де ΔI – тепловий ефект зв'язування води, або інакше: $\Delta I = \Delta r = r_s - r$, де r_s і r – теплота випаровування вологи із тіла при вологовмісті u та із відкритої поверхні; ΔF – вільна енергія зв'язку; ΔS – ентропія зв'язку, або «зв'язана» енергія зв'язку вологи.

Зростання питомої теплоти Δr вказані автори пояснюють формою, або енергією, зв'язку вологи із тілом. За їх твердженням, найменша теплота випаровування відповідає осмотично утримуваний волозі і не перевищує теплоту випаровування вологи із відкритої поверхні (до вологості крохмалю $W=21\%$), а Δr не перевищує 3% від r . В діапазоні зневоднення капілярно-шпаруватих тіл з вологістю близькою до «найбільш міцно утримувомої» ($W \approx 18\%$), величина Δr суттєво зростає.

Тех саме цими авторами відмічено при зневодненні желатину в діапазоні від гігроскопічного стану перебування вологи ($W=63\%$) до фізико-хімічного стану зв'язку вологи з матеріалом ($W=29,7\%$) [1].

Метод В.М.Казанського був застосований також і В.П.Дущенко для визначення питомої теплоти випаровування вологи із різноманітних колоїдних матеріалів (картопляний крохмаль, пшеничне борошно, тощо) та отримано аналогічну залежність енергії зв'язку, або внутрішньокапілярного опору, Δr від його вологовмісту. На рис.1 представлено графічну залежність показника Δr від вологовмісту кукурудзяного крохмалю (за даними Ф.Баунака) і насіння сояшнику (виробничі дані зернозаготівельного підприємства).

Проте щодо колоїдних капілярно-шпаруватих тіл ці пояснення викликають певні сумніви, оскільки йдеться про один і той же фізико-механічний зв'язок вологи із зерном, про одну і ту саму капілярно-утримувому вологу.

Ці сумніви були підкріплені експериментальними дослідженнями впливу на зменшення енергії Δr перемінних градієнтів температури, осцилюючих (циклічних) режимів сушіння зерна, зневодненням зерна за методом «Драй-аерації», тощо. Оскільки при зміні градієнтів температури не відбуваються зміни форм зв'язку вологи з матеріалом, тому слід шукати інші пояснення зменшення енергії Δr . На нашу думку сутність цього у виникненні внутрішньокапілярного розрідження за умов перевищення дифузії вологи

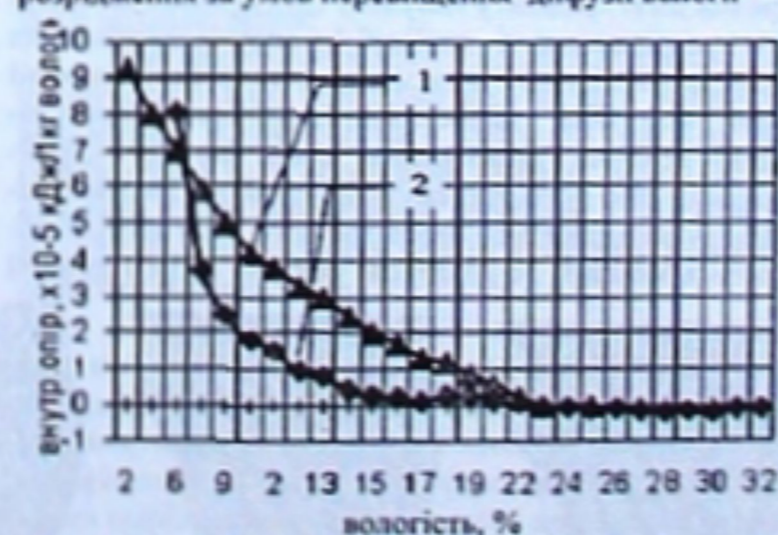


Рис.1. Залежність енергії зв'язку Δr від вологовмісту матеріалу: 1 – кукурудзяного крохмалю (за Ф.Баунака); 2 – насіння сояшнику (виробничі дослідження).

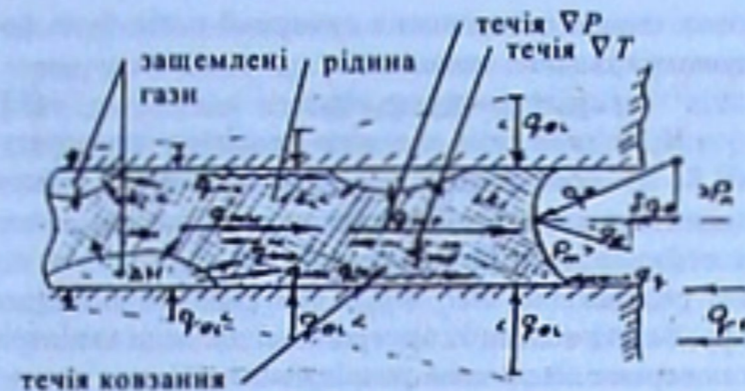


Рис. 4.а) Схема течій газів та теплоти в капілярі зернини при конвективному підведенні теплоти на початковому етапі сушіння, $q_{oc} \neq const$.

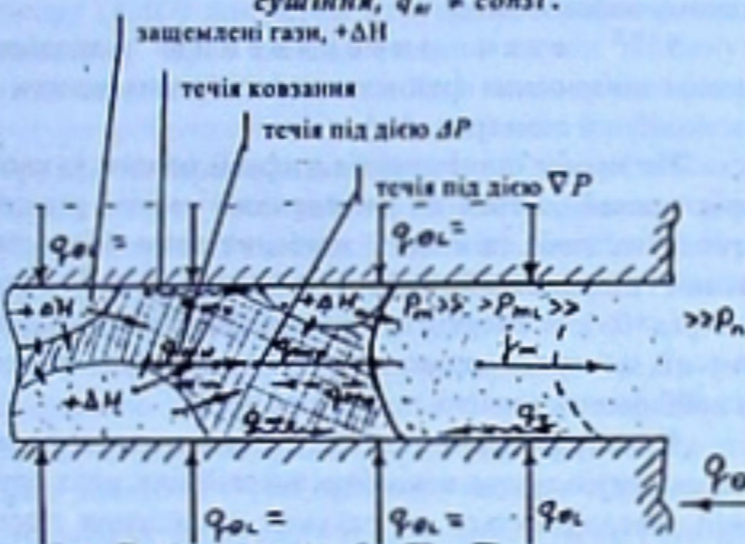


Рис. 4.б) Схема течій газів та теплоти в капілярі зернини при конвективному підведенні теплоти q , на встановленому етапі сушіння, $q_{oc} = const$.

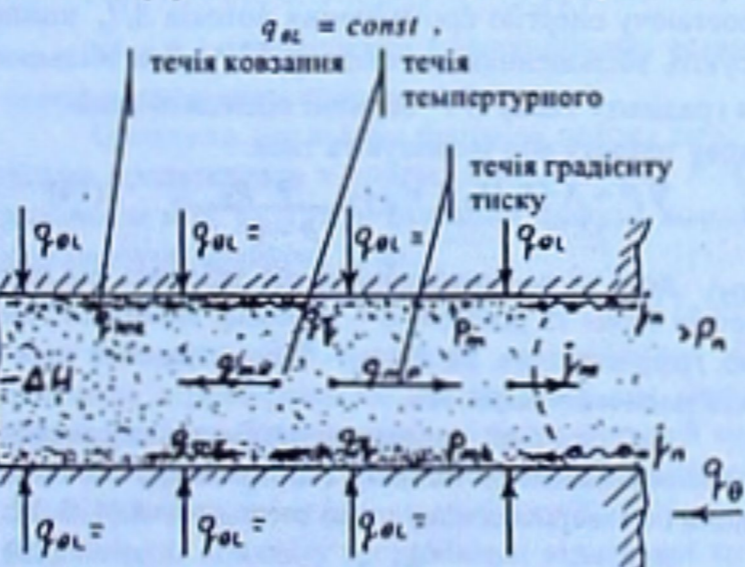


Рис. 4.в) Схема течій газів та теплоти в капілярі зернини при конвективному підведенні теплоти q_{oc} на завершальному етапі сушіння, $q_{oc} \neq const$.

ці тисків (∇P), концентрацій (∇U) та температури (∇T).

У випадку конвективного способу зневоднення зерна, тобто зовнішнього підведення теплоти та сорбції вологи газами, інтенсивність вологообміну J_s може змінюватися від θ до величини внутрішньої дифузії вологи на поверхню зернини J_e . Величина J_s пропорційна потенціалу рушійних сил і описується різноманітними виразами як похідними від формул Дальтона та Ньютона для стаціонарних умов:

$$J_m = a_m \cdot \nabla P, \quad (7)$$

$$\text{та } J_s = a_s \cdot \nabla T, \quad (8)$$

де ∇P та ∇T - градієнти тиску та температури

ри довкілля і поверхні тіла; a_m та a_s - відповідні коефіцієнти пропорційності.

За ізотермічних умов та незначного перепаду температури тиск пари для капілярно зв'язаної вологи та над поверхнею зернини відповідно можна визначити за формулами Томсона [2]:

$$\varphi = \exp\left(-\frac{2 \cdot \sigma \cdot p_s \cdot \cos \theta}{\rho_s \cdot p_s \cdot r}\right) \quad (9)$$

$$\varphi = 100 \cdot \frac{P_s}{P_0} = \exp\left(-\frac{\Delta \rho \cdot g \cdot h \cdot M}{\rho_l \cdot R \cdot T}\right) \quad (10)$$

де $\Delta \rho = (\rho_l - \rho_v)$ - різниця густини рідини та пари; g - прискорення вільного падіння; φ - відносна вологість або відносний тиск пари; T - температура газу; R - універсальна газова стала.

Наведені формули (9) та (10) із-за великої розбіжності з результатами дослідів [2] складно застосувати для практичних розрахунків, проте вони дозволяють зробити якісний аналіз процесів зовнішнього тепломасообміну. Із них видно, що величина рушійного потенціалу (∇P) знаходиться в прямій залежності від температури газів T , їхньої густини ρ та в зворотній від молекулярної маси M .

Внутрішня дифузія переміщення газів J_s в мікрокапілярах зернини складається із декількох течій (рис. 4.а, 4.б і 4.в) [5]. В обмежених умовах мікрокапілярів, незначного перепаду температур та концентрації вологи науковці виділяють такі течії:

- течія газів під дією градієнтів тиску ∇P і температури ∇T за законами Дальтона і Ньютона;
- дифузія-ковзання газів по поверхні капіляра під дією градієнту імпульсу (руху) молекул J_m ;
- течія вологи під дією гідродинамічного напору зашемлених в капілярах газів.

В процесі сушіння зерна із підвищенням вологовмісту волога в капілярах на різних етапах зневоднення може перебувати в рідкому, проміжному та пароподібному станах (рис.3).

Розглянемо механізм внутрішньої дифузії для кожного із цих етапів для умов перебування вологи в капілярах у рідкому стані, тобто для зерна з вологовмістом, що не менш як на 5...8% перевищує критичний. Цей стан вологості є найбільш характерним для умов заготівлі зерна.

При описанні процесу зневоднення капілярно-шаруватого тіла, необхідно враховувати наявність зашемлених рідиною газів в капілярах (рис.4.а). Це газів довкілля та за наслідками дихання зерна. Об'єм цих газів в капілярі зернини перебуває в залежності від способу надходження вологи в зернину та інтенсивності дихання зерна.

1^{*}, початковий етап зневоднення «холодного» зерна (рис. 4.а).** Цей етап відповідає початковим умовам тепломасообміну, за яких основна, якщо не вся, частка теплоти робочих газів витрачається на фазові перетворення вологи поверхневих шарів зернини та можливого незначного нагрівання його поверхневого шару.

Для вилучення вологи із капілярів зернини необхідно здійснити подальші фазові перетворення рідкої вологи зернини (передати зернині теплоту

$g_{\text{вк}}$) та створити умови дифузії пароподібної вологи в доквілля (створення рушійного потенціалу – градієнту тиску ∇P).

Теплота, що підводиться зернині ($g_{\text{вк}}$), розподіляється неоднорідно по довжині капіляру (рис. 4.а) [9]. Залежність розповсюдження та розподілу теплоти в зернині описується законом Ньютона (8).

Інтенсивність зовнішньої дифузії вологи на цьому етапі залежить від градієнту тиску ∇P , інтенсивності внутрішньої дифузії, яка в свою чергу пов'язана з глибиною розташування рідини в капілярі та швидкості розповсюдження поля фазових перетворень вологи по довжині капіляру.

2^{*} етап зневоднення** відповідає поглибленню зони фазового перетворення вологи (рис.4.б). Течія газів формується із відцентрових: основної течії газів під дією градієнту тиску ∇P ($g_{\text{вк}}$), течії ковзання молекул газів ($g_{\text{к}}$), гідростатичного напору рідини та газів ($g_{\text{г}}$) та зустрічних потоків – течії під дією температурного градієнту ∇T ($-g_{\text{т}}$) і гідростатичного опору капілярів $\Delta H_{\text{к}}$ ($-g_{\text{к}}$).

Додаткові витрати енергії на переміщення газів крізь шпарини $\Delta H_{\text{к}}$ ($-g_{\text{к}}$) встановлено дослідями П.А.Новікова та В.С.Яловця. Для умов фільтрації газів крізь шпарувату пластину ними було встановлено коефіцієнт проникності газів [3]:

$$K_f = [2V_{\text{вк}} \cdot p_{\text{атм}} / (p_{\text{вк}}^2 - p_{\text{атм}}^2)] (\mu \cdot V/f), \quad (11)$$

де $V_{\text{вк}}$ – об'ємні витрати газів, $\text{м}^3/\text{с}$; $p_{\text{атм}}$ та $p_{\text{вк}}$ – тиск атмосферний та під шпаруватою пластинною відповідно, Па; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газів, Па·с; f – площа поверхні пластини в плані, м^2 , $d_{\text{к}}$ – еквівалентний діаметр, що відповідає об'єму середньозваженої частинки і розраховують за формулою [1, 4]:

$$d_{\text{к}} = \sqrt[3]{6V/\pi}, \quad (12)$$

де $V = G/\rho_{\text{к}}$ – об'єм середньозваженої частинки, м^3 ; G – маса довільно взятої наважки, кг; $\rho_{\text{к}}$ та $\rho_{\text{г}}$ – кількість частинок в цій наважці та середня густина однієї з них відповідно, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При зовнішньому підведенні теплоти відбуваються фазові перетворення рідини неоднакової інтенсивності по довжині капіляру. Найінтенсивніші – в поверхневій частині капіляру, менш інтенсивні – в заглибленій (в місцях можливого розташування защемлених газів) та найменш інтенсивно фазові перетворення відбуваються в решті найбільш віддаленій від поверхневих шарів зернини частині капіляру.

Течія газів ковзання по поверхні капіляру спрямована в протилежну сторону від напрямку температурного поля (рис.4.а і 4.б), тобто в напрямку від меншої температури газів до більшої і в нашому випадку збігається з напрямком течії вологи.

Гідростатичний газорідинний напір $J_{\text{г}}$ складається із течії рідини та газів в капілярі під дією енергії додаткового тиску $\Delta H_{\text{к}}$, що виникає при підвищенні температури защемлених газів, які розміщені на всій довжині капілярів і може суттєво впливати на внутрішню дифузію вологи. Напір $J_{\text{г}}$ спрямований в бік меншого аеродинамічного опору і також збігається з напрямком течії пари до поверхні зернини. Величина цього напору прямо пов'язана із вмістом защемлених газів та їх температурою. Отже на поча-

ткових етапах зневоднення сумарний потік буде формуватися із таких складових:

$$g = g_{\text{вк}} + g_{\text{к}} - g_{\text{т}} - g_{\text{к}} - g_{\text{г}}; \quad (13)$$

Крім течії газів під дією градієнту температури ∇T , до протидіючих внутрішній дифузії вологи відноситься також течія газів із доквілля (компенсація створюваного розрідження), що формується під дією розрідження $\Delta H_{\text{к}}$ ($-g_{\text{к}}$), яке виникає внаслідок дифузії пари вологи із внутрішньої частини капілярів на поверхню. Величина розрідження $\Delta H_{\text{к}}$ пов'язана з об'ємом витіснених на поверхню капілярів вологи та защемлених газів. Енергія течії газів ($g_{\text{г}}$) пропорційна величині розрідження $\Delta H_{\text{к}}$ і може зростати при інтенсивному вологообміні.

3^{*} етап зневоднення** відповідає умовам завершення фазового перетворення вологи в газоподібний стан (рис. 4.в).

На цьому етапі енергія дифузії вологи із капілярів послаблюється із зменшенням частки рідини, затиснутих газів та енергії ковзання газів. Гідростатичний газорідинний напір $J_{\text{г}}$ та енергія $g_{\text{г}}$ наближені до 0 ($J_{\text{г}} \approx 0$). А енергія зустрічної течії газів у віддалену від поверхні зернини частину капілярів зростає до найбільших значень.

Внаслідок цього інтенсивність зневоднення зерна, як результуюча величина енергій цих двох груп течій, послаблюється за рахунок зменшення гідростатичного газорідинного напору $J_{\text{г}}$ та зростання протидіючих течій.

На завершальному етапі зневоднення зерна, зростаючи енергією протидіючих потоків $\Delta H_{\text{к}}$, компенсують збільшенням потенціалу ∇P . Для збільшення градієнту тиску ∇P зернині підводять додаткову теплоту або зменшують тиск:

$$\nabla P = A \cdot (T_2/T_1)^n + 622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{\text{вк}}}{B - \varphi \cdot p_{\text{вк}}}, \quad (14)$$

де A та n – коефіцієнти, що залежать від параметрів зерна та повітря, φ – відносна вологість робочих газів доквілля, %; B і $p_{\text{вк}}$ – барометричний тиск та тиск насиченої пари, Па.

На підставі експериментальних досліджень, авторами наведено теплову оцінку опору випаровування на завершальному етапі зневоднення [4, 5, 8]:

$$\Delta H_{\text{к}} = \Delta = \frac{q - r_{\text{пов}}}{r_{\text{пов}}}, \quad (15)$$

де $r_{\text{пов}}$ – розрахункове зниження прихованої теплоти пароутворення, яку визначають за формулою [8]:

$$r_{\text{пов}} = 2500 - (2,3 + 0,0014 \cdot \theta) \cdot \theta; \quad (16)$$

де θ – температура зерна, $^{\circ}\text{C}$.

З врахуванням цього, витрати теплоти на випаровування вологи визначають за виразом

$$Q_1 = W \cdot (r + \Delta r); \quad (17)$$

де r – прихована теплота пароутворення, $\text{кДж}/\text{кг}$; Δr – теплота, що затрачена на подолання внутрішнього опору дифузії вологи, $\Delta r = (0,04 \dots 0,30)r$.

Принадно відмітимо, що на практиці для забезпечення вологообміну на завершальному етапі зневоднення зерна збільшують рушійний потенціал підвищенням температури робочих газів. За цих обставин в зерносушильних агрегатах вітчизняних

конструкцій встановлено висхідні режими сушіння зерна, що в свою чергу спричиняє неоднорідне поширення нагрівання зернини, втрати теплоти із відпрацьованими газами та невисока ефективність використання їх вологопоглинаючого потенціалу із-за значного зменшення насиченості відпрацьованих газів.

На підставі теоретично-обґрунтованої моделі внутрішньої дифузії вологи капілярно-шпаруватих тіл та аналізу результатів експериментальних досліджень нами було отримано підтвердження теплоаеродинамічного механізму (ТАМ) дифузії вологи зерна та встановлено чисельну залежність величини коефіцієнту масообміну від капілярно аеродинамічного опору (КАО) для зерна кукурудзи. Графічно цю залежність, через співвідношення частки поглинутих газів зерном від швидкості його зневоднення (температури робочих газів), представлено на рис.5. і 6. Тривалість процесу вирівнювання внутрішньокапілярного тиску (поглинання капілярами газів) зернини різної вологості та швидкості зневоднення (температури робочих газів) – на рис.7, а вплив вмісту защемлених газів на внутрішню дифузію вологи – на рис.8.

Експериментальними дослідженнями було підтверджено зв'язок внутрішнього опору дифузії вологи Δr із ΔH_r і встановлено залежність КАО від стану його вологості W , найменшого розміру тіла зернини l (товщини), швидкості зневоднення $dW/d\tau$ та наявності защемлених газів:

$$\Delta H_r = (a/W) \cdot (l/c) \cdot (dW/d\tau)^b, \quad (18)$$

де a, b, c - коефіцієнти пропорційності встановлюються дослідним шляхом.

Очевидно, що відоме рівняння потоку течії доцільно представляти з правкою на величину КАО, в однаковій мірі як і інші рівняння дифузії вологи в капілярно шпаруватих тілах:

$$\vec{j} = -(a_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla U + a_r^T \cdot \rho_0 \cdot \nabla T + a_p \cdot \nabla p - b \Delta H), \quad (19)$$

Із виразу (18) очевидно, що величина КАО пов'язана з розмірами капілярів. Тому для якісної характеристики КАО доцільно ввести критерій масообміну $K_{КАО}$, який виразимо через співвідношення площі поверхні контакту масообміну S до відстані l від поверхні контакту до найбільш віддаленої точки тіла зернини в напрямі градієнту вологовмісту (∇W):

$$K_{КАО} = S/l, \quad (20)$$

де S – площа поверхні контакту масообміну, m^2 ; l – відстань від поверхні контакту до найбільш віддаленої точки тіла зернини в напрямі градієнту вологовмісту.

Критерій $K_{КАО}$ характеризує енергосміність дифузії вологи та інерційність масообміну.

Оскільки площа S залежить від способу масообміну (конвективний, кондуктивний) та стану рухомості шару зерна (нерухомий, зважений або проміжний), а відстань l – від розміру і форми зернини, а також площі контакту S , тому із збільшенням швидкості руху шару зерна та для конвективного способу масообміну величина $K_{КАО}$ буде меншою і відповідно меншою буде інерційність масообміну та додатковий опір внутрішньої дифузії вологи Δr .

Для умов зневоднення малорухомого шару зер-

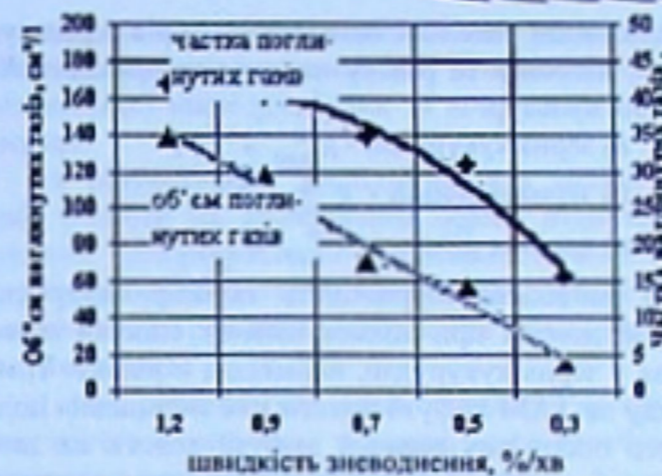


Рис.5. Залежність поглинання зерном газів від швидкості його зневоднення.

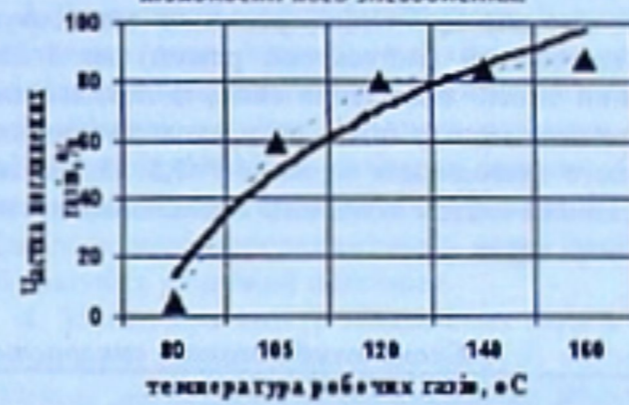


Рис.6. Залежність частки поглинутих зерном газів від температури агенту сушіння, ($W=39\%$, $v=0,14m/s$.)

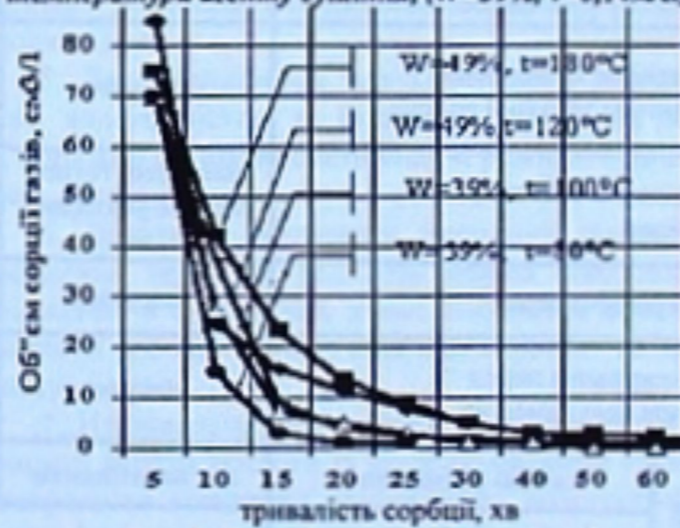


Рис.7. Динаміка сорбції зерном газів.

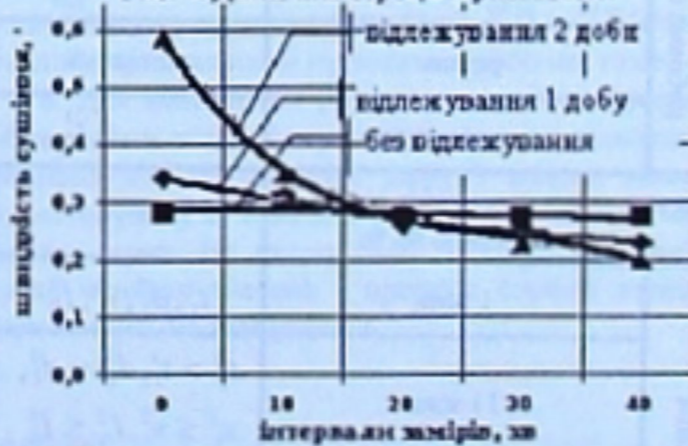


Рис.8. Вплив тривалості відлежування зерна кукурудзи (кміст защемлених газів) на швидкість сушіння ($W=24,3\%$).

на в шахтній прямотечійній зерносушарці критерій $K_{КАО}$ площа S може становити 20...60% від площі поверхні зернини $S=(0,2...0,6) \cdot F$, і за однакових умов масообміну залежить від форми зернини. Виразивши площу зернини через її лінійні розміри отримаємо вираз:

$$K_{КАО} = S/l = 0,3 \cdot [4\pi R(l+3R)]/l, \quad (21)$$

Підставивши чисельні значення розмірів зерна кукурудзи, пшениці та ріпаку отримаємо показник K_{KAO} для цих культур:

- а) зерна кукурудзи - $K_{KAO}^k = 7,5$,
- б) зерна пшениці - $K_{KAO}^p = 3,3$,
- в) насіння ріпаку - $K_{KAO}^r = 1,8$.

Отже найбільша інерційність та опір внутрішньої дифузії вологи при конвективному способі зневоднення у зерна кукурудзи, найменша – ріпаку. Тому з огляду на ТАМ дифузії вологи для зменшення додаткового опору внутрішньої дифузії вологи на завершальних етапах зневоднення крупнодисперсного зерна доцільно встановлювати меншу швидкість сушіння ніж для дрібнодисперсних та застосовувати короткотривалій (імпульсний режим) до 5...15хв, змінений спосіб підведення газів, із подальшим застосуванням методу повільного охолодження та остаточного зневоднення зерна ($\Delta W=1,5...3,5\%$) із використанням систем активного вентилявання в нерухому шарі зерна.

Найбільша частка газів та найінтенсивніше процеси сорбції газів відбуваються протягом перших 5...15 хв (рис.7). Залежність сорбції газів від температури робочих газів та швидкості зневоднення зерна можна описати емпіричними залежностями, зокрема для зерна кукурудзи:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = 2,8 \cdot \theta_1^{0,75} \quad (22)$$

$$V_1 = -31 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) + 173 \quad (23)$$

$$\delta_1 = 52 \cdot \ln(\theta_1) + 13,6 \quad (24)$$

$$\delta_2 = -1,8 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) + 4,6 \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau}\right) + 38,7 \quad (25)$$

де V_1 - об'єм поглинутих капілярами та порожнинами зернини газів, cm^3/kg зерна; δ_1 - частка поглинутих зерном газів до загального об'єму вилученої із зернини вологи, %; θ_1 - температура зерна, °C; t_1 - температура робочих газів, °C.

На підставі експериментальних даних, для періоду незмінної швидкості зневоднення зерна отримано математичне описання залежності K_{KAO} від початкового вологовмісту зерна та швидкості дифузії вологи:

Таблиця 1

Схема комбінованого використання методів та режимів зневоднення зерна

Операції	Традиційна технологія	Вдосконалена технологія		Результат	
		комбіновані методи	комбіновані режими		
Попереднє зневоднення механічно зв'язаної вологи	відсутнє	пронитування зв'язаного стан рухомості шару зерна, робочими газами ($\tau=3...5с, t_1=100...140\text{ }^\circ\text{C}$)		збільшення коэф. ділимості суміші та зменшення питомих витрат енергії	
Відділення сміттєвих домішок	частково, технологічно ускладнено	повне відділення домішок та часткове підігрівання зерна		зменшення енерговитрат, зменшення забруднення довокідля	
Підігрівання зерна	відсутнє	ТНВЧ	відпрацьованими газами	інтенсифікація сушіння	
Відлежування перед сушальною камерою	відсутнє	відсутня технологічна потреба	надсушальна сміність (15...25хв)	збільшення a_m, β та однорідності сушіння, збільшення вологопоглинаючої здатності робочих газів	
Зміна параметрів робочих газів	спосіб підведення	під нагнітанням	під розрідженням	однорідність пошарового сушіння зерна	
	швидкість газів	$V_{Dp1}^1 < V_{H1}^1, V_{Dp1}^2 < V_{H1}^2, V_{Dp1}^3 \leq V_{H1}^3$			
	режим	висхідний	спадний		
	температура	$t_{Dp1}^1 > t_{H1}^1, t_{Dp1}^2 > t_{H1}^2, t_{Dp1}^3 \geq t_{H1}^3$			
Регулювання параметрів відпрацьованих газів t_2, d_2, φ_2	----	швидкістю течії $d_2 = f\left(\frac{t_2}{V_2}\right)$		зменшення витрат теплоти з відпрацьованими газами	
Зневоднення	I зона	$t_1^1, d_1^1, v_1^1, L_1^1$	$t_1^1, d_1^1, v_1^1, L_1^1$	$t_1^1, d_1^1, v_1^1, L_1^1$	збільшення коефіцієнтів a_m, β та однорідності сушіння
	II зона	$t_1^2 > t_1^1, d_1^2 = d_1^1, v_1^2 \leq v_1^1, L_1^2 \leq L_1^1$	$t_1^2 < t_1^1, d_1^2 = d_1^1, v_1^2 \leq v_1^1, L_1^2 \leq L_1^1$		
	III зона	сушіння	---	$t_1^3 < t_1^2, d_1^3 = d_1^2, v_1^3 \leq v_1^2, L_1^3 \leq L_1^2$	
	імпульсна продувка	відсутня	20...50сек		зменшення $K_{KAO}(\Delta t)$
	досушіння	відсутнє	10...20 хв		
Відлежування зерна	---	ЛВ		менші енерговитрати, покращення однорідності сушіння	
Охолодження зерна	---				

$$\Delta E = \left(\frac{\Delta V_{\text{вк}} \cdot \rho_{\text{в}}}{F_{\text{к}}} \right) \left(1 - \frac{dW_t}{dW_{\text{в}}} \right) - \left[V_{\text{тк}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta T}{T} \right)^{\kappa} \right], \quad (26)$$

де $V_{\text{в}}$ - об'єм поглинутих капілярних та порожнинних зернини газів, $\text{см}^3/\text{кг}$ зерна; $\delta_{\text{в}}$ - частка поглинутих зерном газів до загального об'єму вилученої із зернини вологи, %; \square - температура зерна, $^{\circ}\text{C}$; t_1 - температура робочих газів, $^{\circ}\text{C}$.

Вплив защемлених газів на внутрішню дифузію вологи підтверджено в дослідних умовах шляхом збільшення частки цих газів в капілярах зернини (рис. 8).

Зі збільшенням частки «защемлених» (внутрішніх) газів $V_{\text{вк}}$ енергія КМО зменшується і, за певних обставин, може набувати від'ємних значень та сприяти дифузії вологи. Це може спостерігатись при перевищенні внутрішньокапілярного тиску пари зернини над тиском пари на поверхні зернини. Такий стан можна спостерігати при інтенсивному диханні зерна, об'ємному підведенні теплоти тощо.

В першому випадку частка «защемлених газів» $V_{\text{вк}}$ значно зростає. Для обох груп дослідів зразків зерна вологістю 24,3% та 39% вже на 2-гу добу попереднього його відлежування встановлено зростання інтенсивності вологообміну на 15 та 40% відповідно (рис. 8), порівняно з контрольними зразками зерна.

Для контрольних та дослідних зразків зерна кукурудзи, із збільшенням вмістом защемлених газів, початковою вологістю $W_{\text{в}}=39\%$ кінетику зневоднення можна представити в такому вигляді:

а) для контрольних зразків зерна:

$$\left(\frac{\partial W}{\partial \tau} \right) = -0,001 \tau^2 + 0,002 \tau + 0,29 \quad (27)$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) = 0,213 \tau^2 - 1,94 \tau + 5,14 \quad (28)$$

б) дослідного із підвищенням вмістом защемлених газів (1 доба):

$$\left(\frac{\partial W}{\partial \tau} \right) = 0,0043 \tau^2 - 0,0537 \tau + 0,392, \quad (29)$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) = 0,8 \tau^2 - 6,56 \tau + 13,36, \quad (30)$$

в) дослідного із підвищенням вмістом защемлених газів (2 доби):

$$\left(\frac{\partial W}{\partial \tau} \right) = 0,031 \tau^2 - 0,27 \tau + 0,81 \quad (31)$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} \right) = 0,75 \tau^2 - 6,29 \tau + 12,99 \quad (32)$$

Отримані емпіричні залежності швидкості зневоднення та нагрівання зерна кукурудзи із різним вмістом защемлених газів при конвективному способі тепломасообміну при способі підведення газів «під розрідженням» дозволяє стверджувати про безпосередній вплив защемлених газів на внутрішню дифузію

вологи та несуттєвий вплив на швидкість нагрівання тіла зернини, що очевидно з незначного змінення питомої маси дослідних та контрольних зразків зерна.

За результатами досліджень, для зменшення витрат теплоти на зневоднення зерна, підвищення пошарової однорідності та інтенсивності вологообміну запропоновано схему комбінованого використання методів та режимів зневоднення зерна (рис. 9).

Висновки:

1. При вологовмісті зерна близькому до критичного, волога в капілярах зернини може перебувати із порівняно невеликою енергією зв'язку – фізично-механічна волога.

2. Внутрішній опір дифузії вологи Δr зростає з поглибленням зони зневоднення капілярно-шпаруватого тіла та є неодинаковим по довжині капіляру.

3. Фізичну сутність Δr можна пояснити створенням розрідження в капілярах зернини ΔH та втратами енергії при проникненні (фільтрації) газів $K_{\text{г}}$. Для подолання аеродинамічного опору капілярів ΔH збільшують рушійний потенціал.

4. Збільшення вмісту защемлених газів в капілярах зернини сприяє зростанню дифузії вологи та зменшенню витрат енергії зневоднення. Збільшити вміст защемлених газів можна короточасним підвищенням інтенсивності дихання зерна перед його зневодненням.

5. Для зневоднення зерна, особливо із підвищенням вологовмістом та більшими розмірами зернини, доцільно встановлювати спадні режими сушіння замість висхідних.

6. Додатково збільшити рушійний потенціал зневоднення зерна на 15...20% можна створенням розрідження в сушильних зонах зміненням способу підведення робочих газів із «під нагріванням» на «під всмоктуванням».

7. На завершальному етапі зневоднення зерна зменшити втрати теплоти із відпрацьованими газами та покращити пошарову однорідність вологообміну зернини можна короточасним ($t=5...15\text{хв}$) зміненням градієнту рушійних потенціалів ∇P і ∇T (короточасним припиненням підведення робочих газів).

8. Для зменшення втрат теплоти із відпрацьованими газами останніх сушильних зон та підвищення коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи можна використовувати ці гази для нагрівання надміру зволоженого зерна. На цьому етапі критерій Косовича набуває менших значень і процеси сорбції зерном вологи можуть не відбуватись.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Флауменбаум Б.Л. Основы консервирования пищевых продуктов / Б.Л. Флауменбаум, С.С. Таточка, М.А. Гринин // М.: Агротрибунал, - 1986. - 494 с.
2. Лыков А.В. Теплообмен (Справочник). - М.: Энергия, 1972. - 560 с.
3. Гюблер А.С. Влаги в зерне / А.С. Гюблер, В.П. Дубровский, Е.Д. Казанов и др. // - М.: Колос, 1969. - 224 с.
4. Остапчук Н.В. Повышение эффективности сушки зерна / Н.В. Остапчук, А.Б. Шашкин, В.Д. Каминский // - Киев: Техника, 1988. - 180 с.
5. Галочка И.И. Ускоренная тепловая сушка зерна. - Одесса: Поліграф, 2009. - 182 с.
6. Егорев Г.А. Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна. - М.: Колос, 1973. - 264 с.
7. Малко Н.И. Справочник по сушке зерна. - М.: Колос, 1986. - 158 с.
8. Малко Н.И. Энергообеспечение сушки зерна. - М.: Колос, 2004. - 240 с.
9. Sullivan W.N. Heat transfer to flowing granular media / W.N. Sullivan, R.H. Sabersky // Heat and Mass Transfer. - 1975. - vol. 18, № 11. - P.97-107.

Поступила 05.2009
Адрес для переписки: ул. Канатна, 112, г. Одесса, 65039