

Автореферат  
Б 38

Одеська державна академія холоду

на правах рукопису.

**БЕДІН ФЕДІР ПАВЛОВИЧ**

**ГІГРОТЕРМІЧНІ ТА МАСООБМІННІ  
ВЛАСТИВОСТІ  
ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ.**

Спеціальність 05.18.14. — "Холодильна технологія  
харчових продуктів"

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса — 1998

Робота виконана в Одеській державній академії холоду.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор В.О. Загоруйко

Офіційні опоненти: — доктор технічних наук, професор М.О. Гришин  
— кандидат технічних наук, професор В.П. Онищенко

Провідна організація: інститут технічної теплофізики національної академії наук України. м. Київ

Захист відбудеться " 16 " 03 1998 р. о " " " годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.05.20.01 при Одеській державній академії холоду (270026, м. Одеса, вул. Дворянська 1/3).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОДАХ.

Автореферат розісланий " " " 1997 р.

етар  
ради  
Календар'ян.

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність роботи. Однією з основних задач транспортного процесу є забезпечення зберігання грузів, їх кількості та якості шляхом дотримання оптимальних режимів зберігання, перевантаження та перевозки. Особливе місце в технології перевозок займають зернові вантажі, які відносяться до вологих гігроскопічних матеріалів. В їх масі мають місце складні тепловологові процеси. Вони обумовлені процесами "дихання" та життєдіяльності мікроорганізмів, й тісно пов'язані зі структурно-механічними та теплофізичними характеристиками зернового насипу.

Найменш вивченими в даний термін є гігроскопічні та масообмінні властивості зерна та зернового насипу, які в великій мірі впливають на формування мікроклімата вантажа в процесі його перевозки та зберігання. Їх визначення є складною задачею за відсутності в даний термін простих і точних методів прямого експериментального визначення. Таким чином подальші дослідження гіротермічної рівноваги вологих матеріалів та розробка аналітичних методів розрахунку коефіцієнтів та рівнянь внутрішнього масопереносу є актуальними.

Задача визначення масообмінних характеристик зернового насипу ускладнюється тим, що на останні в значний мірі впливає ряд зовнішніх факторів: умови навантаження, висота насипу, вібрація корпусу судна гідродинамічні умови конвективного переносу тепла та вологи по міжзерновим каналам та ін. Облік усіх цих факторів приводить до анізотропності ефективних значень коефіцієнтів та струмів тепла і маси, які формують локальний мікроклімат в зерновій масі і, врешті, фізичні умови морського транспортування насипних грузів.

Метою цієї роботи є дослідження гіротермічних властивостей гречки в гігроскопічній області, а також розробка теоретичних методів розрахунку ефективних коефіцієнтів зерна та зернового насипу.

Рішення цієї задачі потребувало розробити та дослідити:

- методику узагальнення даних гіротермічної рівноваги гречки в широкому інтервалі параметрів вологого повітря, використовуючи обмежені експериментальні дані про їх рівноважне вологоутримання;
- методику аналітичного описування і складання рівнянь стану вологих матеріалів в гігроскопічній області;

xv 849  
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ  
ОНАХТ

- машинні методи для описування гігротермічної рівноваги гречки та подання даних в формах, придатних для практичного вживання;
- методи нерівноважної термодинаміки для одержання диференціальних рівнянь питомих струмів вологи в зерні та зерновому насипу;
- фізичний метод дослідження струмів парової та рідинної фаз в каналах капілярно-пористих колоїдних тіл на ґрунті потенціальної теорії сорбції В.О. Загоруйко;
- аналітичний метод розрахунку кінетичних коефіцієнтів масопереносу зі рахунком багатofакторних зв'язків зернового насипу з зовнішніми умовами.

Наукова новизна даної роботи вміщує в собі:

- аналітичний опис структурно-механічних властивостей зерна та зернового насипу (густина, шпаруватість), з рахунком виду зерна та різних зовнішніх факторів;
- нову форму однопараметричного рівняння стану вологих матеріалів, яка забезпечує більш точний опис характеристичної кривої;
- систему диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу зі споживанням потенціалів переносу  $T$  і  $\phi$ , яка більш зручна в дослідженнях стаціонарних та нестаціонарних полів в зерновому насипу;
- аналітичні залежності для визначення ефективних коефіцієнтів внутрішнього масопереносу в зерновому насипу;
- таблиці теплофізичних властивостей, характеристичну номограму та теплову d-H-діаграму рівноважного вологоутримання гречки.

Наукові положення, які захищаються в роботі:

- застосування потенціальної теорії сорбції є коректним для опису гігротермічних властивостей гречки;
- запропонована в дисертації нова форма однопараметричного рівняння стану гречки забезпечує більш точний опис характеристичної кривої й придатна для розрахунків термодинамічних властивостей на ЕОМ будь-якого виду зернових;
- фізичний метод дослідження масообмінних характеристик зернового насипу, який забезпечує аналітичне визначення ефективних коефіцієнтів внутрішнього масопереносу в зерновому насипу з урахуванням зовнішніх факторів;

- система диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу в перемінних  $T$  та  $\phi$ , яка забезпечує коректний опис концентраційних полів в зерновому насипу;
- метод розрахунку струмів вологого повітря в міжзернових каналах в полі гравітаційних сил.

Практична цінність роботи. Складені в наслідок виконаних досліджень рівняння приведених рівноважних вологоутримань пшениці, гречки та деревинно-волокнистих матеріалів призначені для оптимізаційних розрахунків технологічних процесів транспортування та зберігання морських вантажів.

За допомогою одержаних рівнянь розраховані таблиці приведених вологоутримань гречки, побудована характеристична номограма та теплова d-H-діаграма цієї культури. Таблиці та діаграми призначені для використання персоналом портів та суден, які займаються перевозкою вологих вантажів. Розрахункові матеріали можуть бути використані також фахівцями-технологами в розрахунках процесів переробки зернової продукції.

Запропонований аналітичний метод розрахунку коефіцієнтів масопереносу в зерновому насипу в комплексі з диференціальними рівняннями тепломасопереносу дозволяють вирішувати практичні задачі по визначенню концентраційних та температурних полів в об'єму трюмів та сховищ в конкретних умовах перевезень.

Упровадження результатів досліджень. Робота виконана в рамках програми наукових досліджень ИТТФ НАН України, Міжнародної академії холоду та академії наук технічної кібернетики України по створенню банку даних об рівноважних вологоутриманнях, гігроскопічних властивостях та масообмінних характеристиках технічно важливої харчової продукції.

Складені рівняння рівноважних вологоутримань та коефіцієнти масопереносу досліджених в роботі речовин та теплова d-H-діаграма використовуються в учбовому процесі при читанні курсу “Суднова холодильна техніка”, розділи “Технічне кондиціонування вантажів” та “Теорії тепломасообміну”, а також для розрахунків процесів тепломасопереносу в курсовому та дипломному проектуванні.

Апробація роботи. Основні положення та окремі результати дисертації доповідались й обговорювались на міжнародному конгресі по хімічній технології (ЕССЕ-1, Флоренція, Італія, 1997 р.) і на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу та наукових співробітників Одеського державного морського університету, 1997 р.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох глав, висновку та додатку. Робота викладена на \_\_\_\_\_ сторінках, вміщує 10 рисунків, 20 таблиць, список літератури з 91 найменування та додатку на \_\_\_\_\_ сторінках.

### ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі в стислої формі сформульовані транспортні характеристики зернового насипу як насипного вантажу транспортних суден. Обґрунтована актуальність теми, сформульовані цілі і задачі дослідження, показана наукова цінність і новизна роботи, а також методи, основні результати та практична цінність досліджень.

В першій главі дисертації розглянуті особливості побудови твердого скелета зернини. Дано огляд найбільш відомих та достовірних експериментальних даних, емпіричних рівнянь та методик для опису гігротермічної рівноваги матеріалів рослинного походження. Проаналізовано теоретичні рівняння адсорбції та капілярної конденсації. Показано, що найбільш прийнятною для відображення сумісних процесів адсорбції і капілярної конденсації в реальних зернових матеріалах є потенціальна теорія сорбції В.О. Загоруйко, яка дозволяє на основі модельних зображень доменної структури поверхні сорбента і температурної залежності диполь-дипольної взаємодії описувати теоретично результати експериментальних досліджень в гігроскопічній області.

В другій главі подана розробка методики отримання рівнянь гігротермічної рівноваги вологих матеріалів на прикладі пшениці та деревинно-волокнистих матеріалів (ДВМ). Показано, що найбільш прийнятною формою опису експериментальних даних по гігротермічній рівновазі є метод характеристичних кривих та його безрозмірна форма

$$W = \varphi(H_0). \quad (1)$$

Рівняння (1) дозволяє класти на одну криву всі експериментальні дані, які одержані не тільки за різних температурах, но й речовин різних видів, але подібних по структурі. Таким чином однопараметричне рівняння стану (1) (його графічна форма, яка називається характеристичною кривою)

забезпечує:

- більш якісне згладжування експериментальних даних засобом утягивання в обробку результатів досліджень багатьох авторів та позбавлення від випадкових точок;
- науково-обґрунтоване наведення характеристичних кривих матеріалів по обмеженому числу експериментальних даних;
- можливість передобчислювання гігротермічних властивостей матеріалів, що мають схожу структуру з базовими речовинами.

В главі досліджені та оброблені характеристичні криві всіх сортів пшениці та деревинно-волокнистих матеріалів. В результаті запропоновано новий тип рівнянь, які враховують всі особливості поведінки характеристичних кривих цих матеріалів та більш точну їх апроксимацію.

Для значень  $0,075 \leq H \leq 0,32$

$$W = (H_0 - 0,075)^b \cdot \exp[a + cH_0 + dH_0^2]. \quad (2)$$

Для значень  $0,32 \leq H \leq 1$

$$W = \exp\left[a_1(H_0 - 1) + b_1 \sin\left(\pi \cdot \frac{H_0 + c_1}{d_1}\right)\right]. \quad (3)$$

Порівняння розрахункових та базових значень  $W$  дає середньоквадратичну погрішність  $\delta_{\text{ек}} = 0,5\%$ .

На основі рівнянь (2) і (3) запропоновано більш точний спосіб визначення масоємкостей вологого матеріалу

$$C_{\text{мГ}} = C_{\text{МН}} \left(\frac{\partial H}{\partial \varphi}\right)_{\tau}; \quad C_{\text{мФ}} = C_{\text{МН}} \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_{\varphi}. \quad (4)$$

Цей метод дозволяє виключити з розрахунків двухпараметричну форму рівняння стану

$$W = \varphi \cdot \exp\left[\sum_i \sum_j a_{ij} \cdot \Theta^i \cdot \Phi^j\right], \quad (5)$$

яке по точності апроксимації характеристичної кривої поступає рівнянням (2) та (3).

Досліджено гігротермічну рівновагу гречки. Одержано одно- і двухпараметричне рівняння її стану. Коефіцієнти рівнянь (2) та (3) пшениці, гречки та ДВМ показані в таблиці 1. Погрішність апроксимації  $\delta_{\text{ек}} = 1,25\%$ .

Таблиця 1.

Параметри рівнянь (2) і (3)	значення для		
	пшениці	ДВМ	гречки
a	7,943191	7,181088	8,778722
b	2,609661	2,531518	2,782401
c	-25,23592	-23,45603	-27,809953
d	25,146943	23,300067	28,735573
a <sub>1</sub>	1,80547	2,054514	1,604911
b <sub>1</sub>	-0,032	0,081	0,072
c <sub>1</sub>	-0,32	-0,32	-0,32
d <sub>1</sub>	0,34	0,68	0,68

На базі рівнянь (2) — (5) складені характеристична номограма, теплова d-H-діаграма та докладні таблиці рівноважного вологоутримання і масоємкостей гречки в гігроскопічній області. Одержані результати надані в формах, зручних для інженерних розрахунків.

В третій главі проведено термодинамічний аналіз процесів переносу енергії і речовини в системах з розвиненою поверхнею розділу фаз. В основу метода покладені наступні засновки, які визначають підхід автора до застосування термодинаміки незворотних процесів в багатоконпонентних гетерофазних системах з урахуванням потенціальної теорії сорбції В.О. Загоруйко:

1. Структурна неоднорідність матеріала є просторо ізотропна. Це означає, що інтегральні співвідношення між фазами вологого тіла (твердий скелет, сорбційна волога та рівноважна з нею пара) справедливі для будь-якого елементарного об'єму.
2. Перенесення вологи розглядається для кожної фази зокрема відповідно з термодинамічними силами, а сумарний потік нормується на загальну геометричну поверхню.
3. Молекули сорбата знаходяться під дією потенціального поля по-

верхні сорбента. Потенціальна енергія цих молекул в полі поверхневих сил

$$\Pi'' = R_{\Pi} T \ln P/P'', \quad (6)$$

$$\Pi' = R_{\Pi} T \ln P/P_s - v' \left( C\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial h} \right). \quad (7)$$

4. Справедлива гіпотеза локальної рівноваги. Це означає, що у межах елементарних областей континуума всі види зв'язаної вологи знаходяться у термодинамічній рівновазі між собою й зі своєю парю. Умовою цього є рівність повних хімічних потенціалів кожної компоненти

$$M' + \Pi' = M'' + \Pi'' = \mu_p = \mu_s(P_s) + R_{\Pi} T \ln P/P_s. \quad (8)$$

Така модель вологого тіла дозволяє застосувати поняття польових перемінних до дослідження його внутрішнього масопереносу. Загальне рівняння балансу довільної величини  $A$  в елементі об'єму визначається вираженням

$$A = \int_V \rho a dV. \quad (9)$$

Її повна зміна в часу може здійснюватися з двох причин: потік величини  $A$  зовні у середину об'єму  $V$ , або наявність у середині об'єму джерела (стоку) величини  $A$ .

$$\rho \frac{d a}{d \tau} + \operatorname{div} I_a = \sigma_a. \quad (10)$$

Локальна форма I та II законів термодинаміки встановлює зв'язки між потоками теплоти, ентальпії і ентропії в замкненій термодинамічній системі

$$I_q = I_h = T I_s \quad (11)$$

Для відкритої термодинамічної системи густина теплового потоку у вологому матеріалі, стіни якого не проникнені для воздуха, приймають вигляд

$$I_q = I_h - \mu_p \cdot I_m. \quad (12)$$

В лінійній нерівноважній термодинаміці потік пропорційний силам, які викликали цей потік. З урахуванням перехресних ефектів загальне вираження для питомого потоку вологи в змінних  $\varphi$ ,  $T$ , або  $P$ ,  $T$  мають вид

$$I_m = -\frac{L_{mm}}{T} \left\{ \nabla(R_{II} T \ln \varphi) + \frac{1}{T} \left[ \frac{L_{mh}}{L_{mm}} - (h'_s + R_{II} T \ln \varphi) \right] \nabla T \right\}, \quad (13)$$

$$I_m = -L_{mm} \frac{R_{II}}{P} \left\{ \nabla P + \frac{P}{R_{II} T^2} \left[ \frac{L_{mh}}{L_{mm}} - h'' \right] \nabla T \right\}. \quad (14)$$

Із цих рівнянь здобуті потенціали переносу вологи в однофазній області

$$I'_m = -\lambda'_{m\varphi} \nabla \varphi; \quad I''_m = -\lambda''_{m\varphi} \nabla P \quad (15)$$

Для двухфазного потоку загальне вираження має вид

$$I_m = -\lambda_{m\varphi} (\nabla \varphi + \delta_\varphi \nabla T), \quad (16)$$

де

$$\lambda_{m\varphi} = \lambda'_{m\varphi} + \lambda''_{m\varphi}, \quad (17)$$

$$\delta_\varphi = \varepsilon \frac{\varphi \cdot r_s}{R_{II} T^2} + (1 - \varepsilon) \frac{\varphi \ln \varphi}{T}, \quad (18)$$

$$\varepsilon = \frac{\lambda''_{m\varphi}}{\lambda'_{m\varphi} + \lambda''_{m\varphi}}. \quad (19)$$

Зерновий насип (натура) по своїм теплофізичним властивостям відрізняється від відповідних властивостей окремої зернини з-за наявності міжзернових щілин, заповнених вологим повітрям. Повітря може вільно рухатись в середині насипу під впливом механічних або гравітаційних сил. При великих швидкостях потоку повітря (штучна вентиляція) між воздухом та зерном порушується термодинамічна рівновага і, внаслідок цього, виникає тепломасообмін між ними. В цьому випадку інтенсивність тепломасообміну визначається рівняннями зовнішньої тепломасообміни

$$Q = \alpha F \Delta t, \quad (20)$$

$$G_{сол} = \sigma F \Delta d. \quad (21)$$

Для нерухомого, або повільно рухомого повітря в міжзернових каналах (природна конвекція) інтенсивність тепломасообміну визначається рівняннями внутрішньої тепло- та масопровідності. За умовами справедливості гіпотези локальної рівноваги рівняння (15) — (19) можуть бути застосовані до розрахунків масообмінних характеристик зернового насипу.

При цьому слід застосовувати ефективні значення коефіцієнтів внутрішньої масопровідності.

Виконані дослідження показали, що в зерновому насипу має місце змішаний парорідинний потік: рідинної фази по зернам та парової фази по міжзерновим каналам. При цьому відносний коефіцієнт термовологопровідності  $\delta_\varphi$  суміші визначається рівнянням (18), а величини коефіцієнтів фазового потоку  $\varepsilon$  і масопровідності  $\lambda_{m\varphi}^\varepsilon$ , які входять до нього, будуть визначатись адитивними формулами (з врахуванням закону дифузії)

$$\lambda_{m\varphi}^\varepsilon = (1 - c) \lambda'_{m\varphi} + c \rho_s D, \quad (22)$$

$$\varepsilon^\varepsilon = 1 - \frac{(1 - c)(1 - \varepsilon) \lambda'_{m\varphi}}{(1 - c) \lambda'_{m\varphi} + c \rho_s D}. \quad (23)$$

Аналіз рівнянь (22) і (23) показує, що ефективний коефіцієнт масопровідності  $\lambda_{m\varphi}^\varepsilon$  зернового насипу значно вище, ніж у зернини при невеликих значеннях вологоутримання, а коефіцієнт фазового потоку відрізняється від нуля у всій гігроскопічній області. Коефіцієнт відносної термовологопровідності насипу зерна  $\delta_\varphi^\varepsilon$  і  $\delta_u^\varepsilon$  на порядок вище, ніж у зернини, що свідчить про наявність в ньому великих концентраційних полів за рахунок інтенсивного термодифузійного переносу вологи по міжзерновим каналам. Причому крива стаціонарного розподілення вологи в зерновому насипу розміщується в тепловій d-H-діаграмі практично по вертикалі.

В період транспортування морем великих мас вантажів виникають нестационарні потоки тепла і вологи, які зв'язані з добовими та рейсовими коливаннями параметрів зовнішнього середовища. Для їх коректного опису і дослідження нами одержана система диференціальних рівнянь в потенціалах  $\varphi$  і  $T$  на основі диференційного рівняння матеріального балансу континуума та рівняння термодинамічного стану вологого матеріалу. За рахунком джерела теплоти  $q_V$  і маси  $g_V$  при "диханні" вантажу

$$\rho_H C_u \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div} [\lambda_q^H \nabla T + \delta_T^H \nabla \varphi] + q_V, \quad (24)$$

$$\rho_H C_{mT} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \text{div} [\lambda_{m\varphi}^H \nabla \varphi + \delta_\varphi^H \nabla T] + g_V \quad (25)$$

Тут:

— приведений коефіцієнт теплопровідності зернового насипу

$$\lambda_q^H = \lambda_q + (h' + \varepsilon \cdot \bar{\eta}) \cdot \lambda_{m\varphi} \cdot \delta_\varphi; \quad (26)$$

— приведений коефіцієнт масопровідності

$$\lambda_{m\phi}^{\Pi} = \lambda_{m\phi} \left[ 1 - \frac{C_{m\phi}}{C_u} (h' + \varepsilon \cdot \bar{\eta}) \right]; \quad 27$$

— приведений коефіцієнт дифузії

$$\alpha_m^{\Pi} = \frac{\lambda_{m\phi} \left[ 1 - \frac{C_{m\phi}}{C_u} (h' + \varepsilon \cdot \bar{\eta}) \right]}{\rho_H \cdot C_{mT}}; \quad 28$$

— приведений відносний коефіцієнт термовологопровідності

$$\delta_{\phi}^{\Pi} = - \frac{C_{m\phi} \cdot \lambda_q}{\lambda_{m\phi} [C_u - C_{m\phi} (h' + \varepsilon \cdot \bar{\eta})]}; \quad 29$$

— приведений коефіцієнт Дюфо

$$\delta_T^{\Pi} = \frac{\lambda_{m\phi}}{\lambda_q} (h' + \varepsilon \cdot \bar{\eta}). \quad 30$$

Аналіз рівнянь (24) — (30) показує, що масообмін слабо впливає на теплопровідність насипу, в той час як його вплив на коефіцієнт масопровідності, термовологопровідності та дифузії значно і повинно враховуватись в теплотехнічних розрахунках.

Четверта глава присвячена розробці теоретичних методів розрахунку коефіцієнтів внутрішнього масопереносу зерна та зернового насипу. В результаті виконаних досліджень встановлено, що масообмінні характеристики зернових матеріалів в значній мірі залежать від їх структурно-механічних властивостей. В результаті аналізу існуючих експериментальних даних отримані рівняння для визначення густини зерна, зернового насипу та його шпаруватості в гігроскопічній області з врахуванням набухання, які гідні для будь якого виду й сорту зерна. Показано, що характер шпаруватості визначає ступінь набухання і густину зернятки при сорбції. Запропонована залежність густини зернятки має вид

$$\rho_z = \rho_o \frac{1+u}{1+\rho_o \frac{u}{\rho_p}}. \quad 31$$

Густина і шпаруватість зернового насипу залежать від багатьох фак-

торів: вологості зерна, його виду та сорту, а також способу навантаження, висоти насипу та вібрації судна на переході. Отримані залежності мають вид:

фізична густина

$$\rho_{\phi} = \rho_o \left[ 1,14 + 0,195 \left( 1 + \frac{P_{usz}}{P_o} \right)^{0,36} \right] (a + bu + cu^2); \quad 32$$

шпаруватість

$$C_{\phi} = 1 - \frac{1 + \frac{\rho_o u}{\rho_p}}{1+u} \cdot \rho_{\phi}. \quad 33$$

Значення коефіцієнтів a, b, c для основних зернових культур наведені в дисертації. Рівняння (31) — (33) використані нами під час визначення коефіцієнтів внутрішнього масопереносу.

В рівняннях (15) — (19) невідомими є тільки два кінетичних коефіцієнта чистої масопровідності:  $\lambda'_{m\phi}$  для рідинної та  $\lambda''_{m\phi}$  для парової фаз. Коефіцієнт масопровідності рідинної фази визначений нами з умови течії в'язкої рідини в щелинах і каналах вологого тіла. Рівняння руху в зовнішньому потенціальному полі (якщо знехтувати конвективними та квадратичними членами) має вигляд

$$\nu \Delta \bar{v} = \nabla (R_{\Pi} T \ln \phi), \quad 34$$

де  $\Delta$  — оператор Лапласа.

Рішення рівняння (34), нормування потоку на загальну геометричну поверхню зрнини та приведення його до форми рівняння (16) дає нам значення коефіцієнта масопровідності рідинної фази

$$\lambda'_{m\phi} = \frac{(1+u) \rho_o H_{os}^2 \cdot u_{os} R_{\Pi} T}{12 \cdot \nu_s \cdot \phi \left( 1 + \frac{\rho_o u}{\rho_m} \right)} \cdot \psi'. \quad 35$$

Величина нормуючої функції  $\psi'$  визначена вираженням

$$\psi'(H_0) = \int_0^{H_0} H_0^2 \frac{\nu_s}{\nu_{kan}} C_{MH} dH, \quad 36$$

а відносна в'язкість сорбційної вологи

$$\frac{v_{кан}}{v_s} = 12 \left( 1 - 4 \ln \frac{T}{293} \right) (1 + 0,6 \cdot e^{-0,04 H_0} + 65 \cdot e^{-H_0}). \quad 37$$

Таким чином, наявність рівняння стану  $W=f(H_0)$  вологого матеріалу дозволяє визначити значення норміруючої функції  $\psi'$ , яка визначає міжвидову відзнаку. В зв'язку з цим ми запропонували формули переліку коефіцієнтів масопровідності в зерні по табличним значенням базової речовини пшениці.

В зерновому насипу волога рухається в вигляді рідини по капілярам зернини та в вигляді пари по міжзерновим каналам. Рух пари по міжзерновим каналам можливо шляхом дифузії пари в нерухомому повітрі, а також молярного переносу пари рушійним повітрям. Для нерухомого повітря в міжзернових каналах ефективний коефіцієнт масопровідності зернового насипу

$$\lambda_{мф}^3 = (1-c) \lambda_{мф} + c \phi \rho_s D. \quad 38$$

Останні коефіцієнти внутрішньої масопровідності визначаються вираженнями (18) та (19), в які підставляються їх ефективні значення.

В роботі проаналізовано випадок конвективного потоку вологого повітря по міжзерновим каналам. За використанням рівняння Нав'є-Стокса для в'язкої течії середовища в міжзернових каналах одержано рівняння переносу пари в полі гравітаційних сил. Доведено, що густина потоку залежить від інтенсивності температурного та концентраційного полів в зерновому насипу. Ефективні коефіцієнти вздовж осі  $z$  в рівнянні (16) визначаються вираженнями

$$\lambda_{мфz}^3 = (1-C_\phi) \lambda'_{мф} + C_\phi \cdot \phi \cdot \rho_s \cdot D_{np}; \quad 39$$

$$\varepsilon_z^3 = \frac{C_\phi \cdot \phi \cdot \rho_s \cdot D_{np}}{(1-C_\phi) \lambda'_{мф} + C_\phi \cdot \phi \cdot \rho_s \cdot D_{np}}; \quad 40$$

$$\delta_{фz}^3 = (1-\varepsilon_z^3) \frac{\phi \cdot \ln \phi}{T} + \varepsilon_z^3 \cdot \frac{\phi \cdot r_s}{R_{II} T^2}; \quad 41$$

$$a_{мфz}^3 = \frac{\lambda_{мфz}^3 \left( 1 - \frac{C_{мф}}{C_u} (h' + \varepsilon_z^3 \cdot \bar{\eta}) \right)}{\rho_0 C_{mT}}, \quad 42$$

де приведений коефіцієнт дифузії вологи в повітрі з рахунком молярного

переносу пари визначається рівнянням

$$D_{np} = D + \frac{\rho_s C_\phi^2 d_s^2 a L}{16 \rho_{ca} v \omega^2 (1-C_\phi)^2} \left( \frac{R_{II}}{R_s} - 1 \right). \quad 43$$

Аналіз одержаних рівнянь показує, що вклад кожної з складової масопровідності насипу залежить від його вологоутримання. Основний переїс маси здійснюється конвективним шляхом по міжзерновим каналам. Вклад кожного члена: рідинної течії по зерну —  $\lambda_m$ , дифузії пари  $\lambda_D$  та молярного переносу пари  $\lambda_{kz}$  по міжзерновим каналам для гігроскопічної області показано в таблиці 2.

Таблиця 2.

$\phi$	$\lambda_m \cdot 10^8$ , кг/м·с	$\lambda_D \cdot 10^8$ , кг/м·с	$\lambda_{kz} \cdot 10^8$ , кг/м·с	$\lambda_{мфz} \cdot 10^8$ , кг/м·с	$\varepsilon_z^3$	$\delta_{фz}^3 / \delta_\phi^3$	$a_{мz}^3 \cdot 10^{10}$ , м <sup>2</sup> /с
0,2	0,33	3,22	36	39,6	0,992	0,991	27,4
0,5	1,09	8,06	90,1	99,2	0,989	0,989	82,6
0,7	3,35	11,3	126	141	0,976	0,976	67,3
0,9	15,4	14,5	192	192	0,92	0,92	29,4
1	52	16,1	180	248	0,791	0,791	14,5

В роботі проаналізовані також значення ефективних величин фазового потоку, термовологопровідності та дифузії в зерновому насипу.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.

1. Комплекс виконаних досліджень дозволив встановити, що потенціальна теорія сорбції В.О. Загоруйко є науково-обґрунтованою формою збагачення та відображення сорбційної рівноваги реальних вологих матеріалів, включаючи зернові. На її базі збагачена

гігротермічна рівновага гречки і збудована її характеристична номограма.

2. Розроблена нова форма однопараметричного рівняння стану вологих матеріалів. Одержані рівняння та коефіцієнти характеристичних кривих пшениці, гречки та ДВМ, які забезпечують більш високу точність апроксимації та пологий хід перших похідних.
3. Отримано двухпараметричне рівняння стану гречки. На його основі створена програма і розраховані на ЕОМ докладні таблиці її гігротермічних властивостей: рівноважного вологоутримання  $u$ , ізотермічної  $C_{mT}$  та ізопотенціальної  $C_{m\varphi}$  масоємкостей в гігроскопічній області. Побудована теплова d-H-діаграма гречки, яка згідна для інженерних розрахунків кінетики та статистики вологих матеріалів.
4. Методами нерівноважної термодинаміки і на основі потенціальної теорії сорбції побудована система диференціальних рівнянь тепломасопереносу з потенціалами  $\varphi$  та  $T$ . Отримані рівняння масопереносу в гігроскопічній області. Вибір потенціалів  $\varphi$  і  $T$  полегшує задачу дослідження тепловологих полів в зерновому насипу.
5. Досліджені структурно-механічні властивості зернини та зернового насипу. Проаналізовані й збагачені наявні експериментальні дані по основним видам зернових. Запропоновані залежності для визначення густини зернини, зернового насипу та його шпаруватості для будь якого виду зернових.
6. Обґрунтовано метод теоретичного розрахунку коефіцієнтів внутрішньої масопровідності зернини та зернового насипу. Отримані рівняння для розрахунку коефіцієнтів масопровідності  $\lambda_{m\varphi}$ , відносної термовологопровідності  $\delta_{\varphi}$ , фазового потоку  $\varepsilon$  та дифузії  $a_m$  для зерна та їх ефективних значень для зернового насипу. Табульовані значення цих величин для зерна гречки в широкій області змінювання рівноважних параметрів  $\varphi$  і  $T$  подані в додатку.
7. Досліджено тепломасообмін в зерновому насипу з рахунком конвективного потоку вологого повітря. Отримані та проаналізовані рівняння коефіцієнтів внутрішнього масопереносу з рахунком дифузійного й молярного переносу пари. Дано їх порівняльна оцінка.
8. Підсумки дослідження подані в формі, яка дозволяє включити їх в автоматизований банк даних про гігротермічні та переносні властивості вологих матеріалів і придатних для оптимізаційних розрахунків технологічних процесів транспортування і зберігання зернових вантажів.

Основний зміст дисертації викладений в публікаціях:

1. Бедін Ф.П. Уравнение тепловлажностного состояния гречихи. "Холодильная техника и технология", 1 (58), Одесса, 1997, стр.
2. Загоруйко В.А., Бедін Ф.П. Исследование стационарных полей влагосодержаний в насыпной массе пшеницы. "Холодильная техника и технология". Одесса, 1997, 2, стр.
3. Zagoruyko V.A., Golikov A.V., Bedin F.P. Phenomenological equations and potentials mass transfer in moist materials. The first European Congress on Chemical Engineering, Florence, Italy, 1997, p. 3101 - 3103.

#### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$u$  - вологоутримання вологого матеріалу;  $W$  - приведенне вологоутримання;  $H$  - ширина пори;  $P$  - потенційна енергія сорбата;  $R$  - газова стала величина;  $T$  - температура;  $P$  - тиск;  $\varphi$  - відносне вологоутримання;  $v$  - питомий об'єм, швидкість потоку;  $\sigma$  - поверховий натяг, коефіцієнт масовиддачі;  $h$  - ентальпія, товщина адсорбційної плівки;  $\mu$  - хімічний потенціал;  $\rho$  - густина;  $a$  - питоме значення польової величини  $A$ , коефіцієнт звивистості міжзернового каналу;  $I$  - густина потоку;  $\tau$  - час;  $L$  - кінетичний коефіцієнт, висота насипу зерна;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності (масопровідності);  $\delta_{\varphi}$  - відносний коефіцієнт термовологопровідності;  $\varepsilon$  - коефіцієнт фазового потоку;  $r$  - теплота фазового переходу;  $Q$  - тепловий потік;  $G$  - маса;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловиддачі;  $D$  - коефіцієнт дифузії;  $C_u$  - теплоємність;  $C_{m\varphi}$ ,  $C_{mT}$  - ізопотенціальна та ізотермічна масоємкості;  $\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $a_m$  - коефіцієнт дифузії;  $d_e$  - еквівалентний діаметр;  $\omega$  - коефіцієнт форми зернини;  $q$  - густина тепловиділення;  $g$  - густина масовиділення;  $\Theta$  - приведенна температура.

#### Нарядкові індекси

I - рідинна фаза; II - парова фаза;  $\varepsilon$  - еквівалентний;  $P$  - приведенний.

#### Підрядкові індекси

$s$  - стан насичення;  $p$  - при тиску  $P$ ;  $P$  - пара;  $v$  - повітря;  $m$  - маса;  $\varphi$  - при потенціалі переносу  $\varphi$ ;  $T$  - температурний;  $H$  - насип;  $V$  - об'єм;  $q$  - тепловий;  $z$  - зернина;  $0$  - нулевий (початковий), приведенний;  $\varphi$  - фізичний;  $жс$  - рідина;  $z$  - вертикальна вісь;  $np$  - приведенний.

### АННОТАЦИЯ.

Бедин Ф.П. Гигротермические и массообменные свойства зерновых материалов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.14.-"Холодильная технология, пищевых продуктов". Одесская государственная академия холода. Одесса, 1997.

Защищаются три научных работы, которые содержат результаты исследований гигротермического равновесия гречихи. Задача решена на основе потенциальной теории сорбции. В работе использован аналитический метод определения внутреннего массопереноса в зерне и зерновой насыпи. Получены дифференциальные уравнения нестационарной массопроводности зерновой насыпи в потенциалах  $\varphi$  и  $T$ , удобные для использования в инженерной практике. Получены таблицы равновесного влагосодержания и коэффициенты внутреннего массопереноса гречихи.

Ключевые слова: гигротермическое равновесие, сорбция, зерно, зерновая насыпь, переносные свойства, фазовые потоки, коэффициенты внутреннего массопереноса, эквивалентные значения.

### SUMMARY.

Bedin F.P. Hygrothermic and mass transfer properties of food grains. The dissertation on award of a degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.18.14.-"Refrigerating engineering of food stuffs", Odessa State Akademy of Refrigeration. Odessa, 1997.

Three scientific papers are presented for consideration which contain the results of research hygrothermic equilibrium the buckweat. The problem was solved on base potential theory of sorption. In work used analitical method for determine inner mass transfer in grain and filled mass of wheat. The differential equations of nonstationary mass transfer in potentials  $\varphi$  and  $T$  have been obtained. They are convenient for engineering. The tables of equilibrium moisture content and coefficients of inner mass transfer of buckweat have been obtained.

Key words: hygrothermic equilibrium, sorption, grain, filled mass, transfer properties, phase flow, mass transfer, coefficients, equivalent.