

Автореферат Н  
Л19

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

Лакірі Азедін

УДК 634.46:66.022.34+536.24

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІПРОТЕРМІЧНИХ І  
МАСООБМІННИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР

Спеціальність: 05.14.05- теоретична теплотехніка

Автореферат  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук



Одеса - 1999

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Одеському державному морському університеті

- Науковий керівник - доктор технічних наук (05.18.12), професор Загоруйко Василь Онисимович, Одеський державний морський університет, професор кафедри суднового енергетичного устаткування та технічної експлуатації.
- Офіційні опоненти: - доктор технічних наук (05.18.02), професор Гришин Михайло Олександрович, Одеська державна академія харчових технологій, професор кафедри технології молока та сушіння харчових продуктів;  
- доктор технічних наук (05.04.03), (05.18.12), професор Дорошенко Олександр Вікторович, Одеська державна академія холоду, професор кафедри холодильних установок, директор науково-виробничої фірми "Нові технології"
- Провідна організація Одеський політехнічний університет
- Захист відбудеться 15 квітня 1999 року о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.41.087.01 при Одеській державній академії холоду (адреса 270026, Одеса, вул. Дворянська 1/3)

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ.

Автореферат розісланий 15 березня 1999 г.

секретар  
вченої ради

Р.К. Нікульшин

### Загальна характеристика роботи

#### Актуальність роботи.

Питання енерго- та ресурсозбереження набувають сьогодні особливого значення у зв'язку з подальшим виснаженням світових запасів органічного палива. Це повною мірою стосується таких енергоємних технологій як висушування, транспортування та зберігання сільськогосподарської сировини.

Питанням збереження та транспортування зернових матеріалів суднами морського флоту приділяється велика увага у зв'язку з довготерміною програмою забезпечення населення продуктами харчування. Рішення цих питань можливе при наявності даних про теплофізичні та масообмінні властивості вантажів, що перевозяться, які визначають нестационарні процеси тепломасообміну вантажу з зовнішнім середовищем та, в остаточному підсумку, цілість перевезення та зберігання.

Для країн Афро-азіатського регіону, зокрема для Марокко, дуже важливе значення, як продукти масового споживання, мають зернобобові культури. Таким чином, подальші дослідження їх рівноважних та переносних властивостей, а також розробка аналітичних методів розрахунку коефіцієнтів внутрішнього масопереносу є актуальним завданням.

Експериментальне дослідження гіротермічної рівноваги зернобобових культур значною мірою утруднено внаслідок недостатньої стійкості цих культур у вологому стані, різноманітності форм та видів, які відрізняються за своїми структурно-механічними характеристиками. У зв'язку з цим, експериментальні дані щодо цих культур нечисленні, достовірність одержаних результатів обмежена, а їх статистична обробка та екстраполяція на інші сорти та види культур утруднені.

У цьому відношенні виконана робота відзначається новизною одержаних результатів.

**Мета роботи:** дослідження гіротермічної рівноваги та переносних властивостей деяких зернобобових матеріалів у широкій гігроскопічній області, а також обґрунтування теоретичних методів визначення коефіцієнтів внутрішнього масопереносу зерна і зернового насипу цих культур.

**Розв'язання цього завдання визвало потребу розробити та дослідити:**

- оптимальний метод узагальнення розрізаних експериментальних даних гіротермічної рівноваги бобових культур;
- методику аналітичного описання та складання рівнянь стану основних видів бобових культур у широкій гігроскопічній області;
- машинні методи дослідження та описання гіротермічної рівноваги

xv 1182  
ІНСТИТУТ ХОЛОДУ  
ОНАХТ  
Бібліотека

зернобобових культур і їх подання у формах, зручних для використання в інженерних розрахунках;

- методику аналітичного розрахунку коефіцієнтів внутрішнього масопереносу зерна і зернового насипу бобових культур;
- наближені методи розрахунку коефіцієнтів внутрішнього масопереносу, придатні для практичних розрахунків;
- вибір єдиного потенціалу масопереносу у вологому повітрі та зерновому насипу, який забезпечив би чітке описання межових умов;
- структурно-механічні властивості окремої зернівки та зернового насипу основних видів бобових культур, які визначають їх масоємкість та масопровідність;
- питомий потік тепла, яке переноситься двофазним потоком маси в неоднорідному температурному полі.

#### **Наукова новизна даної роботи містить:**

- аналітичний опис структурно-механічних властивостей зерна та зернового насипу зернобобових культур з урахуванням роду зерна та зовнішніх температурно-вологісних умов (щільність, шпаруватість, коефіцієнт набухання);
- дослідження гіротермічної рівноваги сої, гороху, квасолі та сочевиці в широкій гігроскопічній області. Результати машинних розрахунків приведені в формах, зручних для використання в інженерній практиці (характеристичні номограми, теплові d-H - діаграми, докладні таблиці);
- розробку нової форми однопараметричного рівняння стану сої, гороху, квасолі та сочевиці, що забезпечує більш плавний хід кривих першої та похідної;
- систему диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу з використанням потенціалів переносу T і d, зручну для опису межових умов насипної маси з вологим повітрям;
- методику аналітичного розрахунку ефективних коефіцієнтів внутрішнього масопереносу: масопровідності, тепловологопровідності, коефіцієнту фазового потоку та дифузії вологи у насипу зернобобових культур з використанням машинних та наближених методів;
- дослідження впливу фазових складових двофазного потоку вологи на питомий переніс тепла в нестационарному температурному полі.

#### **Наукові положення, які захищаються в роботі:**

- метод характеристичних кривих у потенціальній теорії сорбції В.А.Загоруйко - єдино прийнятний та коректний спосіб описання гіротермічних властивостей бобових культур;

- нова форма однопараметричного рівняння стану основних бобових культур, яка забезпечує більш точний опис ізопотенціальної масоємкості цих матеріалів;

- аналітичний метод визначення коефіцієнту масопровідності за спрощеними залежностями, який значно полегшує інженерні розрахунки;
- система диференціальних рівнянь тепло- та масопереносу в змінних T та d, які забезпечують коректний опис межових умов у тепловій d-H - діаграмі;
- методика визначення питомого тепла переносу двофазним потоком у нестационарному температурному полі.

#### **Практична цінність роботи:**

- одержано характеристичні номограми, теплові d-H - діаграми та докладні таблиці гіротермічної рівноваги сої, гороху, квасолі і сочевиці, а також ізопотенціальної та ізотермічної масоємкостей цих культур, що придатні для використання в інженерній практиці;
- складено одно- та двопараметричні рівняння стану зернобобових культур, які також можуть бути використані в інженерних розрахунках;
- запропоновано рівняння та докладні таблиці теплопровідності, термовологопровідності, дифузії та коефіцієнту фазового потоку чотирьох видів зернобобових матеріалів, з метою їх використання в інженерних розрахунках;
- розраховані значення ефективних коефіцієнтів внутрішнього масопереносу в зерновому насипу можуть бути використані в розрахунках при визначенні температурних і вологісних полів для трюмів і зерносховищ.

#### **Впровадження результатів дослідження.**

Роботу виконано згідно з програмою наукових досліджень ІТТФ НАН України, міжнародної академії холоду та академії наук технічної кібернетики України для створення банку даних за теплофізичними властивостями технічно важливих харчових матеріалів.

Одержані в роботі рівняння стану вологих бобових матеріалів, а також теплові d-H - діаграми та коефіцієнти масопереносу, використовуються у навчальному процесі при читанні курсу "Суднова холодильна техніка", розділи "Технічне кондиціонування" та "Теорія тепло- та масообміну", а також при розрахунках процесів тепломасообміну в курсовому та дипломному проектуванні.

#### **Апробація роботи.**

Основні положення та окремі розділи дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу і наукових працівників Одеського державного

університету в 1997 та 1998 роках.

#### Структура та обсяг роботи.

Дисертація включає: вступ, чотири розділи, висновок та чотири додатки; роботу викладено на 191 сторінці, вона має 21 рисунок і 40 таблиць, список літератури з 95 найменувань і додаток на 45 сторінках.

#### Зміст роботи.

У вступі стисло сформульовано особливості теплофізичних властивостей зернобобових культур як насипного вантажу і продуктів харчування для країн Афро-азіатського регіону. Обґрунтовано актуальність теми та її новизну, визначено цілі та завдання дослідження, сформульовано методи дослідження та одержано результати, вказано практичну цінність роботи.

У першому розділі дисертації подано огляд експериментальних і теоретичних досліджень гіротермічних та теплофізичних властивостей зернобобових культур. Розглянуто особливості побудови твердого скелету, біологічні та структурно-механічні характеристики окремої зернівки і зернового насипу, описано умови та методи експериментальних досліджень, проаналізовано методи математичного описання та узагальнення результатів експериментів, наведені основні літературні (експериментальні) дані щодо гіротермічної рівноваги бобових культур, обґрунтовано метод характеристичних кривих для обробки експериментальних даних, як найбільш придатний в умовах обмеженого числа ізотерм сорбції.

У розділі подано огляд теоретичних досліджень внутрішнього тепломасопереносу гігроскопічних матеріалів, проаналізовано рівняння тепломасопереносу в гетерогенних системах, обґрунтовано потенціал масопереносу в рідинній та паровій фазах, а також у двофазному потоці, стосовно зернобобових матеріалів.

У другому розділі розглянуто принципи подібності та методи узагальнення експериментальних даних гіротермічної рівноваги зернобобових культур. Проаналізовано три види подібності стосовно бобових культур, визначено межі застосовності рівняння подібності. На підставі аналізу теоретичних методів опису гіротермічної рівноваги вологих матеріалів Ленгмюра, БЭТ, Дубініна, Дерягіна, Загоруйко показана доцільність використання методу характеристичних кривих В.А.Загоруйко для узагальнення політерм сорбції-десорбції бобових культур. На підставі узагальнення побудовано характеристичні криві для двох груп бобових: сої-гороху і квасолі-сочевиці.

$$W=f(H_0), \quad (1)$$

в якому приведені вологоутримання матеріалу  $W = U/U_{os}$  однозначно залежить від приведеної ширини еквівалентної пори  $H_0 = H/H_{os}$ , заповненої вологою. Тут:  $U_{os}$  - максимальне гігроскопічне вологоутримання матеріалу при рівноважних значеннях параметрів вологого повітря  $T=273,15K$ ,  $\varphi=1$ , кг.вологи/кг. сухої маси;  $H_{os}=1,237 \cdot 10^{-8}$  м - ширина еквівалентної пори при тих самих значеннях рівноважних параметрів вологого повітря. Значення  $U_{os}$  основних бобових культур наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

| матеріал          | $U_{os}$ , кг.вологи/кг. сухої маси |
|-------------------|-------------------------------------|
| соя               | 0,333                               |
| горох             | 0,430                               |
| квасоля           | 0,560                               |
| квасоля карликова | 0,489                               |
| сочевиця          | 0,446                               |

Таблювання характеристичних кривих дозволило одержати опорні значення приведені рівноважного вологоутримання, вказаних у таблиці 1 бобових культур. Опорні значення (1) приведені в таблиці 2 і використані нами в подальшому для аналітичного опису гігроскопічної рівноваги, визначення масоємкості цих матеріалів та будування теплових d-H-діаграм рівноважного вологоутримання.

Розділ третій присвячено аналітичному дослідженню гіротермічної рівноваги зернобобових культур. Шляхом апроксимації характеристичних кривих одержано однопараметричні рівняння стану бобових культур.

Для сої та гороху:

сорбція :

при значеннях  $0,03 \leq H_0 \leq 0,24$

$$W = (H_0 - 0,03)^{2,65} \exp(4,89 - 10,37H_0); \quad (2)$$

при значеннях  $0,24 \leq H_0 \leq 1$

$$W = \exp \left[ 2,277(H_0 - 1) - 0,024H_0^{-2} \cdot \sin \left( \pi \frac{H_0 - 0,24}{0,38} \right) \right]; \quad (3)$$

десорбція :

при значеннях  $0,03 \leq H_0 \leq 0,2$

$$W = (H_0 - 0,03)^{8,5} \exp(22,915 - 48,076H_0); \quad (4)$$

при значеннях  $0,2 \leq H_0 \leq 1$

$$W = \exp \left[ 2,18(H_0 - 1) \mp 0,5H^2 \cdot \sin^2 \left( \pi \frac{H_0 - 0,5}{0,5} \right) \right]. \quad (5)$$

Для квасолі та сочевиці (сорбція):

при значеннях  $0,03 \leq H_0 \leq 0,2$

$$W = (H_0 - 0,03)^{3,39} \exp(7,57 - 17,5H_0); \quad (6)$$

при значеннях  $0,2 \leq H_0 \leq 1$

$$W = \exp[2,43(H_0 - 1)]. \quad (7)$$

Таблиця 2

| $H_0 = \frac{H}{H_{os}}$ | значення $W = \frac{U}{U_{os}}$ |           |                    |
|--------------------------|---------------------------------|-----------|--------------------|
|                          | Соя і горох                     |           | Квасоля і сочевиця |
|                          | сорбція                         | десорбція | сорбція            |
| 0,16                     | 0,1135                          | 0,1200    | 0,1170             |
| 0,20                     | 0,1525                          | 0,1712    | 0,1430             |
| 0,24                     | 0,1772                          | 0,1922    | 0,1565             |
| 0,28                     | 0,1832                          | 0,2070    | 0,1750             |
| 0,32                     | 0,1922                          | 0,2190    | 0,1910             |
| 0,36                     | 0,2030                          | 0,2400    | 0,2055             |
| 0,40                     | 0,2220                          | 0,2615    | 0,2250             |
| 0,44                     | 0,2462                          | 0,2885    | 0,2500             |
| 0,48                     | 0,2703                          | 0,3180    | 0,2770             |
| 0,52                     | 0,3063                          | 0,3545    | 0,3105             |
| 0,56                     | 0,3544                          | 0,3935    | 0,3445             |
| 0,60                     | 0,4024                          | 0,4565    | 0,3820             |
| 0,64                     | 0,4535                          | 0,5315    | 0,4214             |
| 0,68                     | 0,5015                          | 0,6095    | 0,4605             |
| 0,72                     | 0,5541                          | 0,7020    | 0,5070             |
| 0,76                     | 0,6096                          | 0,7970    | 0,5575             |
| 0,80                     | 0,6577                          | 0,8530    | 0,6150             |
| 0,84                     | 0,7178                          | 0,8950    | 0,6780             |
| 0,88                     | 0,7809                          | 0,9220    | 0,7480             |
| 0,92                     | 0,8470                          | 0,9290    | 0,8232             |
| 0,96                     | 0,9210                          | 0,9430    | 0,9070             |
| 1,00                     | 1,0000                          | 1,0000    | 1,0000             |

\* Знак "-" застосовується при значеннях  $0,2 \leq H_0 \leq 0,5$ , а знак "+" застосовується при значеннях  $0,5 \leq H_0 \leq 1$

У точках стикування рівняння (2)...(7) мають однакові значення первісних та їх перших похідних, що забезпечує їх "зшивання" в єдину криву. Похибка апроксимації становить біля 1%.

В цьому розділі одержано двопараметричні рівняння стану зернобобових культур у вигляді поліному

$$W = \varphi \cdot \exp \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} \varphi^i \left( \frac{T_0}{T} - 1 \right)^j \right], \quad (8)$$

де  $\frac{T_0}{T}$  - приведена температура ( $T_0=273,15K$  - температура приведення)

Коефіцієнти рівняння (8) приведені в таблиці 3 (для сої та гороху, сорбція), та таблиці 4 (для квасолі і сочевиці, сорбція).

Таблиця 3

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $a_{00}=0,1515017 \cdot 10^1$  | $a_{20}=0,1089760 \cdot 10^3$  | $a_{42}=0,1562614 \cdot 10^4$  |
| $a_{01}=0,4292335 \cdot 10^1$  | $a_{21}=-0,1358546 \cdot 10^3$ | $a_{50}=-0,1070813 \cdot 10^4$ |
| $a_{02}=0,1929651 \cdot 10^2$  | $a_{22}=0,7648952 \cdot 10^3$  | $a_{51}=0,8030704 \cdot 10^3$  |
| $a_{03}=0,1192291 \cdot 10^3$  | $a_{23}=-0,1689278 \cdot 10^3$ | $a_{52}=-0,5068279 \cdot 10^3$ |
| $a_{04}=0,2638127 \cdot 10^3$  | $a_{30}=-0,4015322 \cdot 10^3$ | $a_{60}=0,6799575 \cdot 10^3$  |
| $a_{10}=-0,1960433 \cdot 10^2$ | $a_{31}=0,6607159 \cdot 10^3$  | $a_{61}=-0,7823485 \cdot 10^2$ |
| $a_{11}=-0,1357013 \cdot 10^1$ | $a_{32}=-0,1699499 \cdot 10^4$ | $a_{70}=-0,1741083 \cdot 10^3$ |
| $a_{12}=-0,1206869 \cdot 10^3$ | $a_{33}=0,1110823 \cdot 10^3$  | $a_{71}=-0,8751710 \cdot 10^2$ |
| $a_{13}=0,6351210 \cdot 10^2$  | $a_{40}=0,8756091 \cdot 10^3$  |                                |
| $a_{14}=0,3803900 \cdot 10^1$  | $a_{41}=-0,1163453 \cdot 10^4$ |                                |

Таблиця 4

|                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $a_{00}=0,1578881 \cdot 10^1$  | $a_{20}=0,9746946 \cdot 10^2$  | $a_{42}=0,7423063 \cdot 10^3$  |
| $a_{01}=0,3756055 \cdot 10^1$  | $a_{21}=-0,5677438 \cdot 10^1$ | $a_{50}=-0,4402638 \cdot 10^3$ |
| $a_{02}=0,1037593 \cdot 10^1$  | $a_{22}=0,1542006 \cdot 10^3$  | $a_{51}=0,3575459 \cdot 10^4$  |
| $a_{03}=0,4982468 \cdot 10^2$  | $a_{23}=0,5096552 \cdot 10^2$  | $a_{52}=-0,3109888 \cdot 10^3$ |
| $a_{04}=0,8275039 \cdot 10^2$  | $a_{30}=-0,2729005 \cdot 10^3$ | $a_{60}=0,2269858 \cdot 10^3$  |
| $a_{10}=-0,2075915 \cdot 10^2$ | $a_{31}=0,5893123 \cdot 10^3$  | $a_{61}=-0,2619703 \cdot 10^4$ |
| $a_{11}=-0,2022542 \cdot 10^2$ | $a_{32}=-0,5845366 \cdot 10^3$ | $a_{70}=-0,4739191 \cdot 10^2$ |
| $a_{12}=0,1096346 \cdot 10^1$  | $a_{33}=-0,2010083 \cdot 10^2$ | $a_{71}=0,7285062 \cdot 10^3$  |
| $a_{13}=-0,5290729 \cdot 10^2$ | $a_{40}=0,4552812 \cdot 10^3$  |                                |
| $a_{14}=-0,2554776 \cdot 10^2$ | $a_{41}=-0,2250618 \cdot 10^4$ |                                |

Середньоквадратична похибка апроксимації становила 2%. Двопараметричні рівняння стану (8) використані нами для складання докладних таблиць гігротермічної рівноваги бобових матеріалів, а також їх ізопотенціальної  $C_{m\phi}$  та ізотермічної  $C_{mT}$  масоємкостей:

$$C_{m\phi} = U_{os} \left( \frac{\partial W}{\partial T} \right)_{\phi}, \quad C_{mT} = U_{os} \left( \frac{\partial W}{\partial \phi} \right)_T, \quad (9)$$

які використовуються в диференціальних рівняннях внутрішнього тепломасопереносу.

Через те, що точність апроксимації однопараметричного рівняння стану (1) у два рази вища від двопараметричного (9), нами розроблено методику визначення масоємкостей (9) на підставі однопараметричного рівняння стану.

$$C_{m\phi} = U_{os} \frac{dW}{dH_o} \left( \frac{\partial H_o}{\partial T} \right)_{\phi}, \quad C_{mT} = U_{os} \frac{dW}{dH_o} \left( \frac{\partial H_o}{\partial \phi} \right)_T. \quad (10)$$

Часткові похідні функції  $H_o(\phi, T)$  можна одержати з достатньою точністю на основі докладних таблиць цієї функції, які приведені в спеціальній літературі.

Для зручності використання одержаних даних в інженерній практиці нами побудовано характеристичні номограми рівноважного вологоутримання зернобобових культур у широкій гігроскопічній області. Номограми дозволяють швидко та наглядно розв'язати статичні завдання гігротермічної рівноваги. Для розв'язання багатьох завдань тепломасообміну при зберіганні та в технологічних процесах переробки вологих матеріалів досить зручно використовувати графоаналітичні методи розрахунків у теплових d-H-діаграмах. У цьому розділі приведено методику та складено дві теплові діаграми для бобових культур у безрозмірній формі, які мають досить велику інформативність та широкі можливості.

У четвертому розділі приведено дослідження внутрішнього тепломасопереносу у зернобобових культурах. Докладно викладено аналітичне дослідження внутрішнього тепломасопереносу методами нерівноважної термодинаміки на основі потенціальної теорії сорбції В.А.Загоруйко. Основні передумови моделі потенціального температурного і вологісного полів у масі вологого матеріалу є наступне:

– система розглядається як єдиний компаунд, який включає масу твердого скелету, сорбційної вологи, сухого повітря та водяної пари, які перебувають у шпаринах твердого скелету;

– структурна неоднорідність гетерогенної системи є просторово-

ізотропною і справедливою для як завгодно малого об'єму;

– у процесах переносу тепла та вологи в такій системі справедлива гіпотеза локальної рівноваги;

– умовою локальної рівноваги в системі є рівність повних хімічних потенціалів співіснуючих фаз.

При умові додержання прийнятих припущень, закон збереження енергії та маси має форму диференціальних рівнянь нестационарної тепломасопровідності

$$\rho_o C_u \frac{dT}{dt} = -\text{div}(\bar{Y}_q) + q_v, \quad (11)$$

$$\rho_o \frac{dU}{dt} = -\text{div}(\bar{Y}_m) + g_v. \quad (12)$$

У рівняннях (11) і (12) щільність потоку тепла та маси, згідно з лінійним законом нерівноважної термодинаміки і прийнятою умовою локальної рівноваги, набирає вигляду:

$$\bar{Y}_q = -\lambda_q \bar{\nabla} T + q_m \bar{Y}_m, \quad (13)$$

$$\bar{Y}_m = -\lambda_{m\phi} (\bar{\nabla} \phi + \delta_{\phi} \bar{\nabla} T) = -\lambda_{md} (\bar{\nabla} d + \delta_d \bar{\nabla} T); \quad (14)$$

$$\text{тут: } \lambda_{m\phi} = \lambda'_{m\phi} + \lambda''_{m\phi}; \quad \lambda_{md} = \frac{\phi}{d} \lambda_{m\phi}; \quad \varepsilon = \frac{\lambda''_{m\phi}}{\lambda'_{m\phi} + \lambda''_{m\phi}}; \quad (15)$$

$$\delta_{\phi} = \varepsilon \frac{\phi r_s}{R_n T^2} + (1 - \varepsilon) \frac{\phi \ln \phi}{T}; \quad \delta_d = (1 - \varepsilon) \frac{d^* \eta}{R_n T^2}; \quad (16)$$

$$q_m = TS' + \varepsilon \eta \approx \varepsilon \eta. \quad (17)$$

Розв'язання системи диференціальних рівнянь (11) і (12) не однозначне і залежить від вибору початкових та межових умов. Межові умови при врахуванні сумісних процесів внутрішньої та зовнішньої тепломасопередачі визначаються умовами безперервності потоку тепла і вологи на поверхні розділу системи: вологий матеріал - вологе повітря

$$\left[ -\lambda_q \bar{\nabla} T - \varepsilon \eta \lambda_{md} (\bar{\nabla} d + \delta_d \bar{\nabla} T) \right]_{F_r} = \alpha \xi (T_b - T_m), \quad (18)$$

$$\left[ -\lambda_{md} (\bar{\nabla} d + \delta_d \bar{\nabla} T) \right]_{F_r} = \sigma (d_b - d_m). \quad (19)$$

Коефіцієнти зовнішньої масовіддачі  $\alpha$  і  $\sigma$ , а також коефіцієнти вологовипадіння  $\xi$ , що входять до системи рівнянь (11) та (12), визначаються параметрами системи та гідродинамікою потоку. Коефіцієнти внутрішньої масопровідності визначаються виразами (15)...(17), до яких входять невідомі коефіцієнти фазової масопровідності  $\lambda'_{m\phi}$  і  $\lambda''_{m\phi}$ . Їх експериментальне визначення утруднено, тому що в реальних умовах потік маси має двофазну структуру.

Проте, при наявності однопараметричного рівняння стану вологого матеріалу, ці коефіцієнти обчислюються аналітично, з допомогою рівняння Нав'є-Стокса, яке характеризує течію в'язкої рідини по мікроцилінах, та закону Фіка, який визначає дифузію та ефузію пари по вільних від рідкої фази капілярах. Стосовно зернобобових культур, у яких двофазна структура потоку вологи реалізується лише в області мономолекулярної адсорбції, нами одержані такі вирази для визначення коефіцієнтів фазових потоків ( $\lambda_{mf}^* = 0$ )

$$\lambda_{mf} = \lambda_{mf}' = \frac{\rho_o H_{os}^2 U_{os} R_n T \psi'(H_o)}{12 \nu_s (1+nU) \phi} \quad (20)$$

Нормуюча функція  $\psi'(H_o)$ , яка визначає усереднення потоку сорбційної вологи в полідисперсних порах, одержана аналітично за спрощеною формулою, згідно з запропонованою нами новою моделлю набухаючого капілярно-пористого тіла:

$$\psi'(H_o) = \frac{0,0013021a}{1 - 4 \ln \frac{T}{293}} \left\{ e^{0,96n} [H_o^3 - 3,125H_o^2 + 6,5104H_o - 6,781684] + 6,781684 \right\} \quad (21)$$

Коефіцієнт набухання  $n$  визначається за емпіричними залежностями, які одержані нами внаслідок обробки наявних експериментальних даних:

для сої

$$n = 1,360 + \frac{0,047}{0,1 + U}; \quad (22)$$

для гороху

$$n = 1,176 + 0,43U; \quad (23)$$

для квасолі та сочевиці  $n = \frac{\rho_o}{\rho_{ж}}$ .

У розділі запропоновано методику обробки результатів експериментальних даних для визначення структурно-механічних та переносних властивостей зернового насипу бобових культур. Насипна щільність (натура):

$$\rho_n = \rho_o (1-C) \frac{1+U}{1+nU} \quad (24)$$

Шпаруватість зернового насипу (стандартний насип):

$$C = \frac{aU^2 + bU + c}{dU^2 + eU + f} \quad (25)$$

Коефіцієнти рівняння (25) наведено в таблиці 5:

Таблиця 5

| Найменування культури | Значення коефіцієнтів |       |         |   |     |     |
|-----------------------|-----------------------|-------|---------|---|-----|-----|
|                       | a                     | b     | c       | d | e   | f   |
| соя                   | 0,354                 | 0,525 | 0,0410  | 1 | 1,1 | 0,1 |
| горох                 | -0,217                | 0,404 | 0,482   | 0 | 1   | 1   |
| квасоля               | 0,350                 | 0,493 | -0,0114 | 1 | 1   | 0   |
| сочевиця              | 0,350                 | 0,504 | -0,0110 | 1 | 1   | 0   |

Розглянуто також вплив інших факторів на шпаруватість та натуру зернового насипу (початкового ущільнення, статичного навантаження і вібрації).

Умови масообміну у зерновому насипу значно інтенсифікуються завдяки інтенсивній дифузії вологи по міжзернових каналах. При цьому диференціальні рівняння нестационарної тепломасопровідності (11) та (12) зберігають свій зміст. Проте, коефіцієнти внутрішньої масопровідності зростають. Нами одержані відповідні рівняння стосовно зернового насипу (ефективні значення):

$$\text{теплопровідності } \lambda_{mf}^3 = [\lambda_{mf}' (1-C) + C \rho_s D] l_n; \quad (26)$$

$$\text{фазового потоку } \varepsilon' = \frac{C \rho_s D}{(1-C) \lambda_{mf}' + C \rho_s D}; \quad (27)$$

відносної термовологопровідності

$$\delta_\phi^3 = \frac{\phi \ln \phi}{T} (1 - \varepsilon^3) + \varepsilon^3 \frac{\phi r_s}{R_n T^2}; \quad (28)$$

дифузії вологи  $a_m^3 = \frac{\lambda_{mf}^3}{\rho_n C_{mf}}$ .

У додатку наведено значення коефіцієнтів внутрішнього масопереносу окремої зернівки та зернового насипу для сої, гороху, квасолі та сочевиці в широкій гігроскопічній області. Крок таблиць по  $\phi$  і  $T$  та число значущих цифр дозволяють проводити лінійну інтерполяцію.

Аналіз одержаних рівнянь внутрішньої масопровідності показує, що їх величини значною мірою залежать від вологоутримання та структурно-механічних характеристик окремої зернівки і зернового насипу. Масопереніс у зерновому насипу значно інтенсифікується дифузним переносом пари по міжзернових каналах.

#### Основні результати та висновки.

1. Бобові культури, які являють собою продукти органічного походження, належать за своїми сорбційними властивостями до капілярно-пористих

колоїдних матеріалів. Їх пористість незначна, і основна маса капілярно-конденсованої рідини розміщується в порах, що утворюються в процесі сорбції під впливом розклинювального тиску адсорбційних плівок.

2. Встановлено, що потенціальна теорія сорбції В.А.Загоруйко, яка враховує температурну залежність адсорбційного потенціалу, докладно описує політерми сорбції-десорбції зернових матеріалів і придатна для аналітичного відображення та узагальнення розрізаних експериментальних даних щодо гігротермічної рівноваги зернобобових культур.

3. У роботі узагальнено експериментальні дані за чотирима видами зернобобових культур: сої, гороху, квасолі і сочевиці. Показано, що для узагальнення політерм сорбції-десорбції зручно використовувати метод характеристичних кривих за абсолютними та приведеними параметрами.

4. Складено характеристичні номограми приведенного вологоутримання досліджених бобових культур, які графічно описують їх гігротермічну рівновагу. При цьому соя і горох мають одну приведену характеристичну криву, а квасоля і сочевиця згруповані до іншої кривої. Характеристичні номограми виконано за розміром А1, що забезпечує придатність для інженерних розрахунків.

5. Розроблено однопараметричні рівняння стану двох груп бобових культур. З метою здобуття більш точної апроксимації опорних значень запропоновано дві форми рівнянь, що виражають гігротермічну рівновагу при малих та великих заповненнях пор.

6. Одержано двопараметричні рівняння стану, які забезпечують плавність ходи перших похідних. Визначено і табульовано значення ізотермічної та ізопотенціальної масоємкостей, а також гігротермічної рівноваги сої, гороху, квасолі та сочевиці в широкій гігроскопічній області. Крок по  $\phi$  і  $T$  дозволяє здійснювати лінійну інтерполяцію.

7. Побудовано теплові d-H - діаграми приведенного рівноважного вологоутримання для обох груп бобових, придатні для графо-аналітичних розрахунків процесів внутрішньої та зовнішньої тепломасопередачі. Розміри діаграм також дозволяють використовувати їх в інженерних розрахунках.

8.3 допомогою методів нерівноважної термодинаміки досліджено основні рівняння тепломасопереносу та межові умови у потенціалах  $\phi$ ,  $T$  і  $d$ ,  $T$ . Показано доцільність використання межових умов у потенціалах  $d$  і  $T$ , що значно полегшує дослідження та графо-аналітичні розрахунки процесів зовнішньої тепло- і масовіддачі у теплових d-H - діаграмах рівноважного вологоутримання.

9. Визначено значення питомого потоку тепла та відносного коефіцієнту

термовологопровідності при переносі вологи двофазним потоком у неоднорідному температурному полі. Запропоновано уточнені залежності для їх розрахунку.

10. Досліджено коефіцієнти внутрішнього масопереносу окремої зернівки. Виявлено особливості масопереносу в бобах. На основі запропонованої моделі набухаючого тіла одержано нову форму рівняння нормуючої функції  $\psi'(H_0)$ , з допомогою якої значно спрощується обчислення коефіцієнтів внутрішнього масопереносу бобових культур.

11. Досліджено особливості масопереносу у зерновому насипу. Показано значну інтенсифікацію процесів масообміну за рахунок дифузії вологи по міжзернових каналах. Узагальнено структурно-механічні характеристики зернобобових культур. Запропоновано емпіричні залежності для аналітичного опису характеристик окремої зернівки та зернового насипу (щільності, шпаруватості та коефіцієнту набухання).

12. Одержано рівняння для розрахунку коефіцієнтів внутрішнього масопереносу окремої зернівки та зернового насипу. Складено докладні таблиці коефіцієнтів масопровідності, термовологопровідності, дифузії та фазового потоку окремої зернівки і зернового насипу в широкій гігроскопічній області. Крок по  $\phi$  і  $T$  дозволяє використовувати лінійну інтерполяцію.

Основний зміст дисертації викладено в публікаціях:

1. Лаксирі Аззеддин. Гигротермическое равновесие зернобобовых культур. Вісник Одеського державного морського університету, вип 1. - Одеса, 1998 С.135-140.

2. Лаксирі Аззеддин. Теплові d-H - діаграми рівноважного вологоутримання зернобобових культур. Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій, вип 18 - Одеса, 1998,- С.228-231.

3. Загоруйко В. А., Лаксирі Аззеддин. Исследование внутреннего тепло- и массопереноса в зерне и зерновой насыпи зернобобовых культур. // Придніпровський науковий вісник. Вид. " Наука і освіта" 1998 №90(157), - С.4...11.

4. Загоруйко В. А., Лаксирі Аззеддин. Выбор потенциала массопереноса при внешней массоотдаче влажных материалов. // "Холодильная техника и технология". Одесса, 1998, №1 , - С.72-73 .

Умовні позначення

U - вологоутримання матеріалу; W - приведенне вологоутримання матеріалу; H - ширина пори;  $C_u$  - теплоємність вологого матеріалу;  $C_{mf}$  і  $C_{mt}$  -

ізопотенціальна та ізотермічна масоємкості;  $T$  - температура;  $d, \varphi$  - вологоутримання та відносна вологість повітря;  $\tau$  - час;  $\rho$  - щільність;  $q$  - щільність джерела тепла;  $\lambda_q$  - теплопровідність;  $\lambda_m$  - масопровідність;  $\delta$  - термовологопровідність;  $\varepsilon$  - коефіцієнт фазового потоку;  $r_s$  - тепло паровутворення;  $\eta$  - тепло сорбції;  $S$  - ентропія;  $\bar{Y}$  - щільність теплового (масового) потоку;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі;  $\sigma$  - коефіцієнт масовіддачі;  $\xi$  - коефіцієнт вологовипадання;  $\nu_s$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $n$  - коефіцієнт набухання;  $C$  - шпаруватість;  $l_n$  - звивистість;  $D$  - коефіцієнт взаємної дифузії водяної пари та повітря;  $a_m$  - коефіцієнт дифузії вологи у вологому матеріалі.

Надрядкові індекси:

(') - рідинна фаза; (") - парова фаза; (э) - ефективний; (\*) - приведений.

Підрядкові індекси:

$s$  - стан насичення;  $o$  - приведений, суха маса;  $os$  - у стані  $\varphi=1$  і  $T=273,15K$ ;  $\varphi$  - при потенціалі переносу  $\varphi$ ;  $d$  - при потенціалі переносу  $d$ ;  $T$  - при потенціалі переносу  $T$ ;  $\Pi$  - пара;  $q$  - тепло;  $m$  - маса;  $V$  - об'єм;  $v$  - повітря;  $m$  - матеріал.

#### Анотація

Лаксірі Аззеддін. Дослідження гігротермічних і масообмінних властивостей зернобобових культур. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.05-“Теоретична теплотехніка”. Одеський державний морський університет. Одеса, 1999.

Захищаються чотири наукові праці, які містять результати досліджень гігротермічної рівноваги та коефіцієнтів внутрішнього масопереносу зернобобових культур. У роботі використано метод характеристичних кривих для узагальнення експериментальних ізотерм сорбції і аналітичний метод визначення коефіцієнтів внутрішнього масопереносу у зернині та зерновому насипу бобових культур. Отримано диференціальні рівняння нестационарної тепломасопровідності і межових умов у потенціалах  $d$  і  $T$ , які придатні для графоаналітичних методів розрахунку зовнішньої масовіддачі. Отримано таблиці рівноважного вологоутримання та коефіцієнти внутрішнього масопереносу, а також теплові  $d$ - $H$ -діаграми рівноважного вологоутримання сої, гороху, квасолі та сочевиці.

Ключові слова: гігротермічна рівновага, сорбція, бобові, зерновий насип, переносні властивості, фазові струми, потенціали масопереносу, коефіцієнти масопереносу.

#### Анотація

Лаксіри Аззеддін. Исследование гигротермических и массообменных свойств зернобобовых культур. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 - “Теоретическая теплотехника” Одесский государственный морской университет, Одесса 1999.

Защищаются четыре научные работы, которые содержат результаты исследования гигротермического равновесия и коэффициентов внутреннего массопереноса зернобобовых культур. В работе использован метод характеристических кривых для обобщения экспериментальных изотерм сорбции. Установлено, что потенциальная теория сорбции, учитывающая температурную зависимость адсорбционного потенциала, хорошо описывает полимеры сорбции-десорбции зерновых материалов и пригодна для аналитического отображения и обобщения разрозненных экспериментальных данных. В результате обобщения построены характеристические номограммы равновесного влагосодержания зернобобовых культур. Полимеры сорбции-десорбции сои, гороха, фасоли и чечевицы аппроксимированы однопараметрическими и двухпараметрическими уравнениями состояния этих культур, которые использованы для определения коэффициентов внутреннего массопереноса в нестационарных процессах и построения тепловых  $d$ - $H$ - диаграмм равновесного влагосодержания. Исследован аналитический метод определения коэффициентов внутреннего массопереноса в зерновке и зерновой насыпи бобовых культур. Получены дифференциальные уравнения нестационарной теплопроводности и граничные условия в потенциалах  $d$  и  $T$ , удобные для графо-аналитических методов расчета внешней теплоотдачи.

Определены значения удельного потока теплоты и относительного коэффициента термовлагопроводности при переносе влаги двухфазным потоком в неоднородном температурном поле. Уточнены коэффициенты внутреннего массопереноса отдельной зерновки с учетом особенностей массопереноса в бобах. Предложена новая модель набухающего тела, дающая более реальное значение уравнения нормирующей функции  $\psi'(H_0)$ , значительно упрощающая вычисление коэффициентов внутреннего массопереноса в бобовых культурах. Показаны особенности массопереноса в зерновой насыпи. Отмечена значительная интенсификация процессов массообмена за счет диффузии влаги по межзерновым каналам при наличии градиентов потенциалов тепло- и влагопереноса. Коэффициент фазового потока в зерновой насыпи близок к единице, что позволяет в первом приближении принимать значения  $\varepsilon$ : для зерновки 0, а для насыпи -1. Это значительно упрощает расчеты. Получены таблицы равновесного влагосодержания и коэффициенты

внутреннего массопереноса, а также тепловые d-H- диаграммы равновесного влагосодержания сои, гороха, фасоли и чечевицы.

Ключевые слова: гигротермическое равновесие, сорбция, бобовые, зерновая насыпь, переносные свойства, фазовые потоки, потенциалы массопереноса, коэффициенты переноса.

#### Summary

Laksiri Azzeddine. Research of hygrothermic and mass transfer properties of legumes. The dissertation on award of a degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.14.05 - "The Theoretical thermotechnics". Odessa state maritime university, Odessa, 1999.

Four scientific papers are presented for consideration which contain the results of research hygrothermic equilibrium and inner mass transfer coefficients of legumes. The performance curve method and analytical method has been use in work for generalization of experimental isotherms of sorption and determination inner mass transfer coefficients in grain and filled mass of legumes. The differential equations of nonstationary thermo- and mass transfer and boundary conditions in potentials d and T have been obtained. They are convenient for graphic - analytical calculations of inner mass transfer. The equilibrium mass content tables, inner mass transfer coefficients and thermal d-H-diagrams of equilibrium mass content of soybean, pea, bean and lentil have been obtained.

Key words: hygrothermic equilibrium, sorption, legumes, filled mass, transfer properties, phase flows, mass transfer potentials, transfer coefficients.

XV 1182



Підп. до друку 28.01.99р.  
Папір фінський

Формат 60x84 1/16  
Тираж 100

Офсетний друк  
Замовлення 29

Виробничо-поліграфічний відділ ОЦНТЕІ  
Україна, 270026, м.Одеса, вул. Рішельєвська, 28.