**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**ДОНКОГЛОВ ВАДИМ ІВАНОВИЧ**

**УДК 664.723.047.59**

# РОЗРОБКА БЛОКОВОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ НА ОСНОВІ АВТОНОМНИХ ВИПАРЮВАЛЬНО -КОНДЕНСАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових,
мікробіологічних та фармацевтичних виробництв

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2010

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій

Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки та техніки України
**Бурдо Олег Григорович,** Одеська національна
академія харчових технологій, кафедра процесів, апаратів і
енергетичного менеджменту,
завідувач кафедри

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
**Снєжкін Юрій Федорович,**
Інститут технічної теплофізики
НАН України, (м. Київ),
заступник директора

кандидат технічних наук, доцент
**Косой Борис Володимирович,**
Одеська державна академія холоду,
кафедра програмування,
завідувач кафедри

Захист відбудеться 6 грудня 2010 р. о $10^{30}$ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 Одеської національної академії харчових технологій, за адресою: вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039 в ауд. А – 234.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій, за адресою: вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039.

Автореферат розіслано 03 листопада 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор К.Г. Іоргачова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Для сучасного зерносушіння характерні дві проблеми: високі енерговитрати й забруднення зерна продуктами згоряння. Витрати енергії на зерносушіння вище, ніж енерговитрати при виробництві зерна. Тому доцільно шукати резерви зниження енергетичних витрат у зерносушінні. В Україні в якості сушильного агенту використовують суміш топкових газів і повітря. Безпосередній контакт продуктів згоряння із зерном погіршує його якість у зв'язку з можливим проникненням у продукт канцерогенних компонентів. Напрямком вдосконалення сушильних технологій є: зниження енергетичних витрат на видалення вологи, забезпечення екологічної безпеки продукту, що висушується, розробка високоефективної зерносушильної техніки. Можливості зниження витрат палива на сушіння не вичерпані й тут є невикористані резерви. Досвід застосування у світовій практиці теплових труб і термосифонів (ТС) дозволяє розраховувати на можливість створення на їхній базі енергоефективних і екологічно безпечних апаратів для термообробки зерна. Тому, розвиток наукової бази про механізми тепло -масообміну в апаратах із ТС і створення на їхній основі сушарок, методик їх розрахунку є актуальним. Комбінування рекуперативного підігріву зерна за допомогою випарювально-конденсаційних систем й традиційного конвективного сушіння при глибокій рециркуляції теплоносія дозволило розробити в ОНАХТ енергоефективну сушарку, яка гарантує екологічну чистоту зерна. Мінімізація питомих енергетичних витрат сушарки досягалась шляхом системної оптимізації й визначення раціонального сполучення конструктивно- компоновочних та режимних параметрів, часткової рециркуляції теплоносія. Наукові основи такої зерносушарки розроблено в дисертаційних роботах О. Г. Бурдо, С. Гайди, О. В. Зикова.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана за тематикою держбюджетних досліджень проблемної науково-дослідної лабораторії Одеської національної академії харчових технологій № 5/09 П «Новітні енергетично ефективні харчові технології та нанотехнології в АПК», (№ держреєстрації 0109U000400*)*.

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності та забезпечення екологічно чистого сушіння зерна, розробка конструкції та методів розрахунку блокової зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- вивчити механіку обтікання поверхонь ТС різної форми зерновим потоком;

- визначити вплив компонування пучка ТС на інтенсивність тепловіддачі;

- вивчити процес сушіння зерна в шаровому апараті із трубчатими поверхнями підведення енергії;

- розробити моделі розрахунку процесів у блоковій зерносушарці з випарювально-конденсаційними системами енергопідводу;

- розробити інженерну методику розрахунку блокової зерносушарки з випарювально-конденсаційними системами енергопідводу;

- провести обчислювальний експеримент та оптимізувати конструкцію;

- виготовити до випробування експериментальний зразок зерносушильної установки.

*Об'єкт досліджень* – процес зерносушіння.

*Предмет досліджень* – блокові зерносушарки на основі випарювально-конденсаційних систем енергопідводу.

*Методи досліджень* – комплекс традиційних і сучасних фізичних та математичних методів досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В роботі вперше сформульовані та доведені наукові положення:

- існуюче протиріччя між прийомами інтенсифікації тепломасообміну (що пов'язане з підвищенням витрати теплоносія) і завданнями енергетики сушильних установок (що потребують зниження витрати теплоносія) можна вирішити при організації рециркуляції теплоносія по контуру «теплогенератор - зона нагрівання зерна - теплогенератор» і переводі сушильної шахти на рекуперативний спосіб підводу енергії.

- узгодження специфіки структури зернового шару, що рухається в трубному пучку, з компоновочними параметрами пучка сприяє активному перемішуванню шару, рівномірному прогріву зернового об’єму й інтенсифікує тепломасоперенос.

У результаті аналітичних і експериментальних досліджень уперше:

- розроблена та досліджена конструкція блокової зерносушарки з випарювально-конденсаційними системами енергопідводу при повній рециркуляції теплоносія;

- досліджено механіку обтікання ТС різного профілю та розмірів зерном пшениці та кукурудзи: визначено поля швидкостей при обтіканні ТС з нахилом; ступінь гальмування та змішування зернового потоку при обтіканні ТС;

- обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність застосування ТС з кутом нахилу $60^{o}$ в блоковій зерносушарці;

- одержано моделі в числах подібності, для визначення ступені змішування зернового шару, питомих енерговитрат на сушіння в блоковій зерносушарці;

- досліджена кінетика процесу сушіння пшениці в блоковій зерносушарці: визначено коефіцієнти тепловіддачі від конденсатора ТС до зернового потоку; термограми зернового потоку; криві сушіння;

- дано математичний опис кінетики сушіння, що дозволяє розрахувати коефіцієнти масовіддачі, тривалість процесу сушіння пшениці в блоковій зерносушарці;

- отримано залежність питомих енерговитрат на сушіння від температури поверхні

конденсатора ТС в блоковій зерносушарці;

- розроблено інженерну методику й комп'ютерну програму для розрахунку блокової сушильної установки;

- проведено комп'ютерне моделювання процесу сушіння в блоковій зерносушарці.

**Практичне значення отриманих результатів.** Теоретичними й експериментальними дослідженнями та виробничими випробуваннями розроблено, установлено й практично підтверджено:

- ефективність розробленої конструкції блокової зерносушарки з випарювально-конденсаційними системами енергопідводу при повній рециркуляції теплоносія;

- коректність розробленої інженерної методики й комп'ютерної програми для розрахунку блокової сушильної установки.

Розроблена комп'ютерна програма може бути використана для проектування нової сушильної установки різної продуктивності. Розроблено проект науково-технічної документації на блокову зерносушарку з повною рециркуляцією теплоносія. Новизна технічних рішень дисертаційної роботи захищена 1 патентом України. Промислову апробацію зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія проведено на дочірньому підприємстві "Гайсинський комбінат хлібопродуктів" відкрите акціонерне товариство «Концерн Хлібпром».

**Особистий внесок здобувача** полягає у плануванні та проведенні експериментів, виборі об'єктів та методів експериментальних досліджень, обробці та узагальненні отриманих науково обґрунтованих результатів у вигляді формування висновків та пропозицій, підготовці матеріалів досліджень до публікування, виконаних у співавторстві та самостійно, розробці технологій і нормативної документації, промислової апробації розроблених технологій. Особистий внесок здобувача підтверджується представленими документами та публікаціями.

**Апробація роботи.** Основні результати досліджень доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях професорсько-викладацького складу ОНАХТ в 2006 – 2010 р., міжнародних науково-практичних конференціях: 73 науковій конференції молодих вчених аспірантів і студентів (м. Київ, 2007); "Підвищення енергетичної ефективності харчових і хімічних виробництв" (м. Одеса, 2007); "Удосконалення процесів і устаткування харчових і хімічних виробництв" (м. Одеса, 2008); "Проблеми енергетичної ефективності харчових та хімічних виробництв (м. Одеса, 2009); "Прогресивні техніка та технологія харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі" (м. Харків 2007); "Проблеми регіональної енергетики", (Молдова, 2009).

**Публікації.** Матеріали дисертації, одержані результати та рекомендації з їх використання повністю відображені у 15-ти наукових роботах, опублікованих автором, з них 9 публікацій у фахових виданнях, 1 патент України, 2 статті у наукових виданнях, у тезах 3 доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел, що включає 128 найменувань (12 сторінок) та 2 додатків (8 сторінок). Роботу викладено на 167 сторінках, які включають 81 рисунок (43 сторінки), 27 таблиць (15 сторінок).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** викладено загальну характеристику роботи – актуальність теми, зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і завдання досліджень, наукову новизну, практичне значення та особистий внесок автора, представлена апробація дисертаційної роботи, публікації автора.

У **першому розділі** "Сучасний стан питання зерносушіння" проаналізовано стан техніки для сушіння зерна, енерговитрати і якість зерна при сушінні. Розглянуто принципи підвищення енергетичної ефективності технологій сушіння, переваги й недоліки існуючих конструкцій конвективних сушарок. Приведено схему блокової зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія.

Блокова зерносушарка – принципово нова конструкція, у якій енергопідведення до шару зерна відбувається за рахунок контакту з нагрітою поверхнею трубчастого модуля. Енергія палива (рис. 1) трансформується в енергію топкових газів, що у випарнику (1) перетворюється в енергію водяної пари, далі пара надходить у конденсатор (2), розміщений у сушильній шахті (3). Пара конденсується й віддає енергію зерну. Конденсат повертається у випарник. Завдання досліджень полягають у вивченні механіки обтікання поверхонь ТС різної форми зерновим потоком; тепловіддачі від поверхні труб до потоку зернистого матеріалу; дослідження впливу компонування пучка ТС на інтенсивність тепловіддачі; дослідження процесу сушіння зерна. Проведено аналіз режимів сушіння зерна в сучасних шахтних зерносушарках. Їх необхідно врахувати при дослідженні процесу сушіння зерна в блоковій зерносушарці.

Сушіння зернових у шахтних сушарках проводяться при температурах агента сушіння – 100…350ºС, зерна 45…60 ºС. Пропонується експериментальні дослідження сушіння в блоковій сушарці проводити при режимах наближених до рекомендованих. Розглянуті методи розрахунку та математичні моделі тривалості сушіння, тепло -масообміну при сушінні в конвективних сушарках. Обґрунтовано необхідність розробки моделі розрахунку процесів у блоковій зерносушарці.

У **другому розділі** "Об'єкти та методи досліджень" викладена інформація про об'єкти та методи досліджень. Розглянуто поглинаючу ємність, теплофізичні властивості зерна, механічні властивості, вплив ударних навантажень на зміну якості зерна, термостійкість зерна, властивості вологого зерна при висиханні, гранично припустимі можливості видалення вологи. В розділі розглянуто експериментальні методи досліджень. Дослідження механіки обтікання шаром зерна

поверхні термосифонів проводилося візуальним методом за допомогою “міченого шару”. Експерименти проводилися на озимій пшениці Одеська 51. Для проведення експериментів використовувалася прямокутна шахта зі стінками з органічного скла (рис. 2). Картини обтікання ТС фотографувалися, проводилась відеозйомка потоку зерна. З картин обтікання визначалися конфігурація й розміри зони впливу ТС. Величини локальних швидкостей міченого шару визначали за допомогою програми Macromedia Flash.

На зображення об'єкта в розкадрованому вигляді наносилася розмірна сітка. Крок сітки відповідав L=10 мм. Шахта розділялася на три зони – центральну, у якій зерно рухалося по осі труби, дві бічні, у яких зерно рухалося ближче до стінок шахти. Експерименти по механіці обтікання проведено для різних культур та розмірів ТС (табл. 1).

Після розрахунку швидкостей будувалися епюри швидкостей у шахті для різних профілів труб а також для труби з нахилом. З картин обтікання, отриманих у дослідженнях, одержано ступінь змішування (Д) при проходженні міченого шару зерна через зону труби.

Таблиця 1

**Діапазон досліджень механіки обтікання**

| Тип термосифона | Розмір, мм | Швидкість потоку, мм/с | Продукт |
|---|---|---|---|
| Круглий | Ø 13…40 | 3,5…30 | Пшениця, кукурудза |
| Плоский | 46,2×5,3;<br>13,0×3,3 | 3,5…30 | Пшениця, кукурудза |

Потік зерна рухається усередині сушильної шахти зі швидкістю $\omega_з$ (рис. 3). Еквівалентний діаметр зернівки $d_{э.з.}$. Зерно, що рухається, омиває нагріті трубки конденсатора, діаметр яких $d_{тр}$. Площа поверхні конденсатора F, температура ТС - $T_п$. Зернівка нагрівається за рахунок контакту з поверхнею модуля. Тиск пари над поверхнею матеріалу $P_{пр}$, площа зерна $F_з$. Зернівку омиває потік повітря, яке відіграє роль дифузійного середовища. Коефіцієнти дифузії: водяної пари в повітря – $D_п$; вологи всередині матеріалу – $D_з$. Швидкість повітря в міжзерновому просторі $\omega_{мп}$; температура повітря $T_{сух}$; температура «вологого» термометра $T_м$; парціальний тиск насиченої пари в повітрі $p_в$.

Інтенсивність процесу масовіддачі прямо пов'язана з температурою нагрівання зерна. Ступінь нагрівання зерна визначається його теплофізичними властивостями – коефіцієнтом температуропровідності (а), середньою вологістю ($u_{ср}$), швидкістю руху зернового потоку.

Залежність коефіцієнту масовіддачі $\beta$ від режимних факторів отримана за допомогою методу аналізу розмірностей. Складено розмірну матрицю (табл. 2). Отримане рівняння в числах подібності має вигляд:

$$Nu_д = f\left[Pe_т, \left(\frac{t}{T}\right), \left(\frac{a}{D}\right)\right] \quad (1)$$

де $Nu_д$ – число Нусельта дифузійне, $Pe_т$ – число Пєклє теплове, t/T - симплекс температур; a/D - симплекс тепло- фізичних параметрів.

Таблиця 2

**Розмірна матриця**

| Параметр | Символ | Розмірність |
|---|---|---|
| Коефіцієнт масовіддачі | β | $L\cdot\tau^{-1}$ |
| Температура | T | T |
| Розмір частки | d | L |
| Швидкість | ω | $L\cdot\tau^{-1}$ |
| Коефіцієнт дифузії | D | $L^2\cdot\tau^{-1}$ |
| Коефіцієнт температуропровідності | a | $L^2\cdot\tau^{-1}$ |

Аналогічно отримано вид рівняння в числах подібності для розрахунку питомих енерговитрат на процес сушіння:

$$\frac{j}{j_0} = A\cdot\left[\left(Re_в\right)^k\cdot\left(\frac{T_{сух}}{T_п}\right)^n\right] \quad (2),$$

де j - енерговитрати на процес сушіння, МДж/кг; $j_o$ = 2,5 МДж/кг – базові енерговитрати на процес; $Re_в$ – число Рейнольдса для повітря, що рухається в міжзерновому просторі; $T_{сух}/T_п$ – симплекс температур; A, k, n - константи.

Визначено вид рівняння для розрахунку ступеня змішування:

$$Д=B\cdot Fr^l \quad (3),$$

де Д - ступінь змішування; Fr – число Фруда; B, l - константи.

Для розрахунку тривалості сушіння використано структуру рівняння у числах подібності, що запропонована О. В. Ликовим:

$$\frac{u_i}{u_ê} = C\,Fo_ä^{ê_1}\,Bi_ä^{ê_2} \quad (4)$$

де $u_н/u_к$ – безрозмірна вологість; $Fo_д$ – число Фур'є дифузійне; $Bi_д$ – число Біо дифузійне; C, $k_1$, $k_2$ - константи. Для дослідження процесів тепло- масообміну в блоковій зерносушарці розробили експериментальну установку (рис. 4). Досліди по сушінню проведено на пшениці (табл. 3).

Таблиця 3

**Діапазон вимірюваних величин**

| Культура | виході із сушаркиповітря на Швидкість | Вологість зерна | продуктуВитрата | потокузернового Температура | модулі ТСТиск у | що підводитьсяПотужність, | сушінняТривалість |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | м/с | % | кг/с | °С | МПа | кВт | хв. |
| Пшениця | 3…20 | 12…25 | 0,02…0,4 | 20…100 | 0,1…0,4 | 1…4 | 0…180 |

Зволоження зерна перед дослідженнями, розрахунки коефіцієнтів тепло- масовіддачі проведено за стандартними методиками.

У **третьому розділі** ”Експериментальне моделювання процесів гідродинаміки та тепло-масообміну в блоковій зерносушарці” наведені результати досліджень, що проведені на експериментальних стендах кафедри процесів апаратів та енергетичного менеджменту ОНАХТ. Отримано 44 картини обтікання зерновим шаром ТС. Характерні картини обтікання представлені на рисунку 5. В експериментах змінювалась швидкість зернового потоку $\omega_{зп}$ та розміри ТС. При обтіканні плоскої труби отримані локальні значення швидкості шару зерна та ступінь гальмування (рис. 6, 7), $\omega_{зп}$ =30 мм/с.

Також отримані поля швидкостей при обтіканні круглого ТС кукурудзою. Характерні картини обтікання шаром зерна труби з нахилом представлені на рис. 8. Швидкість шару $\omega_{з.п.}$ =20 мм/с, ∅ 27 мм.

В експериментах по візуалізації (рис. 8 а) використані два мічених шари для того, щоб оцінити ступінь перемішування зернівок. Видно, що в зоні дії труби відбувається інтенсивне перемішування міченого шару. Застійні зони відсутні. Отримано поля швидкостей при обтіканні труби з нахилом (рис. 8 б). У результаті досліджень механіки обтікання й аналізу фізичних властивостей зерна пшениці визначена форма пучка та кут нахилу ТС (60°) що сприяє ефективному перемішуванню шару зерна, усуненню застійних зон і зон відриву потоку, що є

передумовою для підвищення теплопередаючих характеристик модуля. З картин обтікання, одержано ступінь змішування при проходженні міченого шару зерна через зону труби (рис. 9 а). Отримано залежність коефіцієнта тепловіддачі від середньої швидкості потоку зерна при температурі поверхні модуля $T_п$=142,9°С (рис 9 б).

Зі збільшенням середньої швидкості потоку зерна зростає значення коефіцієнта тепловіддачі. Це пояснюється умовами обтікання потоку поверхні труби. Отримано криві сушіння та термограми при сушінні пшениці в блоковій зерносушарці (рис. 10, 11). Для вимірювання температури зернового потоку усередині шахти використовували три термопари. Дані первинних перетворювачів температури надходили на АЦП і вводилися в ПК. Температуру повітря, що йде із сушарки, визначали за допомогою стандартного психрометра і двох термопар. Вологість зерна вимірювали за допомогою цифрового вологоміра РМ-600. Максимальна швидкість сушіння (0,17 %/хв.) в серії всіх дослідів отримана за умов $T_п$=142,9°С, $\omega_{м.п.}$= 1,6 м/с, витраті зерна $G_з$=0,02 кг/с, вологості зерна 25 %.

Питомі енерговитрати $Э_{уд}$, МДж/кг визначалися як відношення загальної виптраченої енергії до кількості видаленої вологи.

Енерговитрати нижче, ніж у традиційних конвективних сушарок. Узагальнення дослідних даних по механіці обтікання та кінетиці сушіння проведено в числах подібності (рис. 13, 14, 15). Отримано рівняння по визначенню ступені змішування для круглого та плоского ТС.

Експериментальні дані, отримані при сушінні пшениці в блоковій зерносушарці, є вихідними для математичного моделювання. Узагальнення результатів досліджень представлено в логарифмічних координатах. Послідовно отримано вплив кожного комплексу на процес (рис. 14, 15). Визначено коефіцієнти рівняння в числах подібності для розрахунку числа Нусельта дифузійного. Рівняння має наступний вигляд:

$$Nu_{äð} = 1.03 \cdot 10^{-6} \cdot \left[ \left( Pe_ò \right)^{0.36} \cdot \left( \frac{T_ï}{T_ç} \right)^{-0.84} \right] \quad (5).$$

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 15 %. Аналогічно отримано показники степені в рівнянні для визначання безрозмірної вологості:

$$\left( \frac{u_Н}{u_К} \right)_р = 4.632 \left( Fo_Д \right)^{0.16} \cdot \left( Bi_д \right)^{0.13} \quad (6).$$

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 14 %.

Узагальнення даних по питомим енерговитратам проведено із застосуванням програми MathCad. Отримано рівняння:

$$\frac{j}{j_0} = \left[ 73.5 \cdot \left(Re_{в}\right)^{-0.43} \cdot \left(\frac{T_{сух}}{T_{п}}\right)^{0.85} \right] \quad (7)$$

Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними в межах 14 %.

У **четвертому розділі** "Інженерні методи розрахунку та апробація результатів роботи" наведені результати комп'ютерного моделювання, оптимізації блокової сушильної установки, пропозиції до впровадження. Алгоритм розрахунку сушильної установки представлено як сукупність окремих блоків (рис. 16). У блоці 3 розраховано теплофізичні параметри повітря (в'язкість $\nu_в$, густина $\rho_в$), що рухається в міжзерновому просторі. У блоці 4 розраховано параметри теплоносія в конденсаторі ТС. У блоці 5 визначено параметри зернового потоку.

Дані блоків 3 - 5 є вихідними для подальших розрахунків. У блоці 6 відбувається гідродинамічний розрахунок апарата, результатом якого є $\omega_з$, $\omega_{м.п.}$ У блоках 7, 8, 9 використано критеріальні рівняння відповідно (5), (6), (7) отримані після у$T_{п}$, °C ння експериментальних даних. В блоці 9 визначено загальну кількість тепла на процес. У блоці 10 розраховано геометричні параметри апарату. Результатом розрахунку є геометричні параметри сушарки, площа поверхні ТС. Діапазон комп'ютерного моделювання наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

**Діапазон комп'ютерного моделювання**

| Позначення | Розмірність | Найменування | Значення $\omega_з$, $\omega_{мп}$ |
|---|---|---|---|
| $G_з$ | кг/с | Витрати зерна в сушарці | 0,01…0,5 |
| $T_з$ | °C | Температура зернового потоку | 45…90 |
| u | % | Вологість зерна | 13…20 |
| $P_{гр}$ | МПа | Тиск у модулі ТС | 0,1…0,4 |
| $\omega_в$ | м/с | Швидкість повітря на виході із сушарки | 2,5…22,5 |

В ході комп'ютерного моделювання діапазон температур зернового потоку, тиску у модулі ТС, швидкостей повітря виходить за межі експериментальних значень. Визначено вплив витрат зернового потоку, температури зернового потоку на процес масовіддачі. Температура зернового потоку варіювалася з інтервалом 5°C. Діапазон температур зернового потоку перевищує гранично допустимі температури для зерна. Для порівняння на графік нанесені значення коефіцієнтів масовіддачі, отримані для різних витрат зернового потоку в ході експериментів (рис. 18).

Збільшення швидкості повітря приводить до інтенсифікації процесу видалення вологи із сушарки й до зменшення питомих енерговитрат на сушіння (рис. 17).

Проведено комп'ютерне моделювання тривалості процесу сушіння (рис. 19) за допомогою програми MathCad з використанням рівняння (6). За результатами комп'ютерного моделювання розроблений експериментальний зразок сушильної установки з повною рециркуляцією теплоносія (рис. 20). Основними його елементами є: шахта, повітропроводи, конденсатор, парогенератор, паропровід. Теплообмінні трубки виконані з нахилом. Це сприяє перемішуванню зернового потоку й повному контакту теплопередаючої поверхні із продуктом. Кут нахилу труб однаковий, а в сусідніх пучках ТС закручений у протилежних напрямках, що є додатковим чинником перемішування потоку. Щоб уникнути заклинювання зернівок, колектори сусідніх пучків мають різну висоту. Самі пучки підключені паралельно, вихід конденсату здійснюється в загальний колектор рідини.

За наведеним алгоритмом (рис. 16) розроблено проект блокової зерносушарки продуктивністю 12 т/ год. В порівнянні з зерносушаркою ДСП-12 у блоковій зерносушарці знижено енерговитрати з 5 до 3,54 МДж/кг і габарити (табл. 5).

Таблиця 5

**Технічні характеристики блокової зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія**

| Показники | Сушарки | |
|---|---|---|
| | ДСП-12 | Блокова сушарка |
| Продуктивність (при зниженні вологості з 21 до 15%, т/год) | 12 | 12 |
| Внутрішні розміри шахти, м: | | |
| довжина | 3,25 | - |
| ширина (діаметр) | 1,0 | 1,5 |
| висота | 12,6 | 11,2 |
| Кількість зерна в сушильній камері, т. | 11,9 | 14,8 |
| Кількість зерна в охолоджувальній камері, т. | 6,4 | |
| Тривалість перебування зерна, хв: | | |
| у сушильній камері | 59 | 73,9 |
| в охолоджувальній камері | 32 | |
| Параметри модуля конденсатора ТС | | |
| площа поверхні, $м^2$ | - | 47 |
| діаметр патрубка ТС $d_{тр}$, м | - | 0,05 |
| Енерговитрати, МДж/кг | | |
| | 5 | 3,54 |

Розраховано економічну ефективність впровадження нової системи зерносушіння. Вихідними даними для розрахунків є режимні характеристики, компоновочні параметри блокової

зерносушарки. Розрахунок проведено для ДП "Гайсинський комбінат хлібопродуктів" ВАТ «Концерн Хлібпром». Розроблена блокова зерносушарка, продуктивністю 12 т/год. Додаткові капітальні витрати складуть 56680 грн., які окупляться на протязі 3 сезонів.

## ВИСНОВКИ

1. На основі аналітичних, експериментальних досліджень та результатів комп'ютерного моделювання розроблено конструкцію та методи розрахунку блокової зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія. Сушарка забезпечує екологічно чисте сушіння зерна при підвищеній енергетичній ефективності установки.

2. Встановлено, що при обтіканні труб з нахилом забезпечується максимальний ступінь змішування потоку зерна. Кут нахилу теплопередаючих труб 60° гарантує ефективне перемішування зернового шару, що є передумовами для максимальних характеристик тепловіддачі до зернового потоку.

3. Визначено вплив швидкості зернового потоку на коефіцієнт тепловіддачі. Зростання швидкості зернового потоку в 3 рази приводить до підвищення коефіцієнта тепловіддачі на 40 %.

4. Встановлено, що на швидкість сушіння в блоковій зерносушарці впливає температура поверхні модуля $T_п$, витрати зерна $G_з$, і швидкість повітря в міжзерновому просторі $\omega_{м.п.}$ Найменша швидкість (0,03%/хв) відповідала $T_п$=120,2°С, $G_з$=0,02 кг/с і $\omega_{м.п.}$=0,4 м/с. Максимальне значення швидкості сушіння (0,17%/хв) досягалося при максимальній температурі $T_п$=142,9°С, $G_з$=0,02 кг/с і $\omega_{м.п.}$=1,6 м/с. Швидкість сушіння наближено до конвективних сушарок.

5. Вплив швидкості потоку на коефіцієнт масовіддачі β має експонентний характер. Підвищення швидкості в 7 разів приводить до зростання коефіцієнта масовіддачі β в 2,5 рази. Підвищення температури поверхні термосифона на 10°С приводить до зростання коефіцієнта масовіддачі β на 8 %.

6. Базу експериментальних даних по кінетиці сушіння пшениці в блоковій сушарці з повною рециркуляцією теплоносія узагальнено критеріальним рівнянням (5). Рівняння дозволяє розрахувати коефіцієнт масовіддачі β у межах числа Пєклє $1{,}2\cdot10^3 \le Pe_т \le 1{,}3\cdot10^4$, і параметричного комплексу $2{,}1 \le T_п/T_з \le 4$, погрішність не більше 15 %.

7. Розроблена інженерна методика, за допомогою якої можливо проводити розрахунок тривалості процесу сушіння (6) з точністю не нижче 14 %.

8. Результати експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання показують, що енерговитрати блокової зерносушарки 2,8…3 МДж/кг нижче існуючих конвективних сушарок.

9. Розроблено проект блокової зерносушарки з повною рециркуляцією теплоносія продуктивністю 12 т/год. В порівнянні з установкою ДСП-12 питомі енерговитрати знижуються на

30 %, тривалість сушіння скорочується на 10 % при практично однакових габаритних параметрах установки. Термін окупності сушарки становить 3 сезони.

**Список праць, опублікованих за матеріалами дисертації**

**1.** Бурдо, О. Г. Невтішний виходить моніторинг енергозатрат на зернопереробних підприємствах України [Текст] / О. Г. Бурдо, О. В. Зиков, В. І. Донкоглов // Зерно і хліб. 2006. - № 3. - С. 46-47.

*Особистий внесок здобувача: проаналізовано стан сучасної сушильної техніки, розроблено схему потоків теплоносія в блоковій зерносушарці при повній рециркуляції теплоносія.*

**2.** Бурдо, О. Г. Тенденції розвитку зерносушильної техніки [Текст] / О. Г. Бурдо, О. В. Воскресенська, В. І. Донкоглов // Зернови продукти і комбікорми. - 2006. - №2. - С. 48-53.

*Особистий внесок здобувача: розроблено експериментальний стенд по дослідженню механіки обтікання ТС.*

**3.** Бурдо, О. Г. Тенденції розвитку зерносушильної техніки [Текст] / О. Г. Бурдо, І. В. Безбах, В. І. Донкоглов // Прогресивні техніка та технологія харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі: зб. наук. пр. ХДУХТ. – Х., 2007. –Вип. 1 (5). - С. 333-340: рис. ; табл. – Бібліогр. : 6 назв.

*Особистий внесок здобувача: досліджено вплив режимних параметрів на енерговитрати в блоковій зерносушарці.*

**4.** Бурдо, О. Г. Развитие энерготехнологий сушки [Текст] / О. Г. Бурдо, В. І. Донкоглов // Наук. пр. /ОНАХТ. – О., 2007. - Вип. 30, т. 1. - С. 208-213.

*Особистий внесок здобувача: розроблена та обґрунтована методика експериментальних досліджень теплообміну в блоковій зерносушарці.*

**5.** Безбах, І. В. Развитие тепломассообменной аппаратуры на основе вращающихся термосифонов [Текст] / І. В. Безбах, В. І. Донкоглов // Наук. пр. /ОНАХТ. – О., 2007. - Вип. 30, т. 1. - С. 213-217.

*Особистий внесок здобувача: досліджено вплив режимних параметрів на коефіцієнт тепловіддачі в блоковій зерносушарці.*

**6.** Тепло- массообменная аппаратура на базе двухфазных модулей [Электронный ресурс] / О. Г. Бурдо, Омар Саид Ахмед, И. В. Безбах, В. И. Донкоглов // Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв: Матеріали XII Міжнар. наук. конф., Одеса 8-12 верес. 2008 р. / ОНАХТ. – О., 2008. – С. 301-305: табл..; рис. – Бібліогр.: 2 назв. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).

*Особистий внесок здобувача: досліджена кінетика сушіння пшениці в блоковій*

*зерносушарці та проведена математична обробка кривих сушіння.*

**7.** Развитие конструкций тепло- массообменных аппаратов на базе автономных двухфазных модулей [Текст] / А. В. Зыков, И. В. Безбах, Омар Саид Ахмед, В. И. Донкоглов // Наук. пр. /ОНАХТ. – О., 2008. - Вип. 32. - С. 208-217.

*Особистий внесок здобувача: узагальнено базу даних по механіці обтікання, приведено рівняння по визначенню ступені змішування.*

**8.** Бурдо, О. Г. Кінетика сушіння пшениці в апаратах на базі термосифонів [Текст] / О. Г. Бурдо, І. В. Безбах, В. І. Донкоглов // Наук. пр. /ОНАХТ. – О., 2009. - Вип. 36, т. 1. - С. 297-302.

*Особистий внесок здобувача: отримано критеріальне рівняння для розрахунку тривалості процесу сушіння в блоковій зерносушарці.*

**9.** Безбах, И. В. Энергетика процессов термообработки дисперсных продуктов в аппаратах на базе термосифонов [Текст] / И. В. Безбах, Е. В. Латанский, В. И. Донкоглов // Наук. пр. /ОНАХТ. – О., 2009. - Вип. 35, т. 2. - С. 193-195.

*Особистий внесок здобувача: отримано критеріальне рівняння для розрахунку питомих енерговитрат в блоковій зерносушарці.*

**10.**Пат. на корисну модель 44160 Україна, МПК F26B 3/08 (2009.01). Спосіб теплової обробки дисперсних матеріалів [Текст] / Бурдо О. Г., Безбах І. В., Донкоглов В. І. ; власник Одес. нац. акад. харч. технологій. - № U200902568; заявл. 15.04.09; опубл. 25.09.09, Бюл. № 18.

*Особистий внесок здобувача: розроблено спосіб теплової обробки дисперсних матеріалів.*

**11.**Безбах, И. В. Исследование работы термосифонов при обработке дисперсных и вязких пищевых сред [Текст] / И. В. Безбах, Омар Саид Ахмед, В. И. Донкоглов // Problemele energeticii regionale. Revistă stiintifică, informational – analitică si ingenerească / Academia de stiinte a moldavei institutue de energecică. –Chisinău, 2009. - №1. – С. 78-80 : табл.. ; рис. – Библиогр. : 11 назв.

*Особистий внесок здобувача: проведено порівняння характеристик блокової сушарки з існуючими, приведено результати комп'ютерного моделювання.*

**12.**Безбах, И. В. Процессы термообработки дисперсних продуктов в апаратах на базе термосифонов [Электронный ресурс] / И. В. Безбах, Е. В. Латанский, В. И. Донкоглов // Проблеми енергетичної ефективності харчових та хімічних виробництв: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 9-11 верес. 2009 р. /ОНАХТ. – О., 2009. – С. 276-278. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).

*Особистий внесок здобувача: отримано критеріальне рівняння для розрахунку процесу сушіння в блоковій зерносушарці.*

**13.**Донкоглов, В. І. Підвищення енергетичної ефективності зерносушіння [Текст] / В. І. Донкоглов // 73-я наук. конф. молодих учених, асп. і студ.″Наукові здобутки молоді – вирішенню

проблем харчування людства у XXI ст.″: прогр. і матеріали, Київ, 23-24 квіт. 2007р. / НУХТ: у ІІ ч. ч. ІІ – К., 2007.- С. 150.

*Особистий внесок здобувача: розроблена та обґрунтована методика експериментальних досліджень механіки обтікання ТС.*

**14.**Бурдо, О. Г. Энергоэффективные технологии зерносушения [Текст] / О. Г. Бурдо, В. И. Донкоглов // Повышение энергетической эффективности пищевых и химических производств: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 4-7 июня 2007 г. / ОНАПТ. – О., 2007. - С. 213-218.

*Особистий внесок здобувача: розроблена та обґрунтована методика експериментальних досліджень масообміну в блоковій зерносушарці.*

**15.**Безбах, И. В. Перспективы тепломассообменной аппаратуры на основе термосифонов [Текст] / И. В. Безбах, В. И. Донкоглов // Повышение энергетической эффективности пищевых и химических производств: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Одесса, 4-7 июня 2007 г. / ОНАПТ. – О., 2007. - С. 260-264.

*Особистий внесок здобувача: досліджено вплив режимних параметрів на коефіцієнт масовіддачі в блоковій зерносушарці.*

## АНОТАЦІЯ

Донкоглов В. І. Розробка блокової зерносушарки на основі автономних випарювально -конденсаційних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв.

Одеська національна академія харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2010.

Дисертаційна робота присвячена розробці блокової зерносушильної установки, методів її розрахунку. Аналітичні й експериментальні дослідження підтвердили, що блокова зерносушарка забезпечує екологічно чисте сушіння зерна при підвищеній енергетичній ефективності. Досліджено механіку обтікання термосифонів зерном; визначені поля швидкостей, ступінь гальмування зернового шару. Обґрунтовано й підтверджено ефективність роботи термосифонів з нахилом. Кут нахилу теплопередаючих труб 60° гарантує ефективне перемішування зернового шару, що є передумовами для максимальних характеристик тепловіддачі до зернового потоку. Визначено вплив швидкості зернового потоку на коефіцієнт тепловіддачі. Зростання швидкості зернового потоку в 3 рази приводить до підвищення коефіцієнта тепловіддачі на 40 %. Встановлено, що на швидкість сушіння в блоковій зерносушарці впливає температура поверхні модуля, витрати зерна, і швидкість повітря в міжзерновому просторі. Отримано математичний

опис кінетики сушіння, модель у числах подібності для визначення питомих енерговитрат на сушіння, тривалості сушіння. Розроблено інженерну методику й комп'ютерну програму для розрахунку блокової сушильної установки. Проведено комп'ютерне моделювання процесу сушіння в блоковій зерносушарці. Розроблено проект науково-технічної документації на блокову зерносушарку.

**Ключові слова:** сушіння, блокова зерносушарка, коефіцієнт масовіддачі, термосифон.

## АННОТАЦИЯ

Донкоглов В. И. Разработка блочной зерносушилки на основе автономных испарительно -конденсационных систем. - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 - процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств.

Одесская национальная академия пищевых технологий Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2010.

Диссертационная работа посвящена разработке блочной зерносушильной установки, методов ее расчета.

На основе литературных данных проведен анализ энергозатрат и экологии традиционных зерносушилок. Выявлены достоинства и недостатки существующих конструкций. Рассмотрены принципы повышения энергетической эффективности технологий сушки. Приведены принципиально новые схемы зерносушения. Проведен анализ режимов сушки зерна в конвективных сушилках. Обоснована необходимость разработки зерносушильной установки, которая обеспечивает экологически чистую сушку зерна при повышенной энергетической эффективности. Предложена схема блочной зерносушилки с полной рециркуляцией теплоносителя. Блочная зерносушилка – принципиально новая конструкция, в которой энергоподвод к слою зерна происходит за счет контакта с нагретой поверхностью трубчатого модуля. Модуль представляет собой автономную испарительно-конденсационную систему – термосифон.

Рассмотрены известные модели процессов тепло- массообмена для конвективных сушилок. Традиционные модели ориентированы на конвективные зерносушилки, в которых воздух является тепло- влагоносителем. Особенность блочной зерносушилки в том, что воздух используется только в роли диффузионной среды. Обоснована необходимость разработки модели расчета процессов тепло- массообмена в блочной зерносушилке.

Задачи исследований состоят в изучении механики обтекания поверхностей термосифонов разной формы зерновым потоком; теплоотдачи от поверхности труб к потоку зернистого материала; исследование влияния компоновки пучка труб на интенсивность теплоотдачи; исследование

процесса сушки зерна в блочной зерносушилке; разработке инженерных методов расчета блочной зерносушилки.

Эксперименты по механике обтекания термосифонов проведены для разных зерновых культур и размеров труб. В результате исследований механики обтекания и анализа физических свойств зерна пшеницы определена форма пучка, гарантирующая эффективное перемешивание зерна, что обеспечивает максимальную теплоотдачу к зерновому потоку, устранение застойных зон и зон отрыва потока. Получены эпюры скоростей в шахте для разных профилей труб, а также для наклонной трубы. С использованием картин обтекания, рассчитана степень смешивания при прохождении меченного слоя зерна через зону трубы.

Функциональная зависимость коэффициента массоотдачи от режимных параметров получена при помощи метода анализа размерностей. Аналогично получены уравнения в числах подобия для расчета удельных энергозатрат на процесс сушки, степени смешивания зернового потока.

Получены кривые сушки и термограммы при сушке пшеницы в блочной зерносушилке. Установлено, что на скорость сушки в блочной зерносушилке влияет температура поверхности модуля $T_п$, расход зерна $G_з$, и скорость воздуха в межзерновом пространстве $\omega_{м.\,п.}$ Наименьшая скорость (0,03 %/мин) отвечала $T_п$=120,2°С, $G_з$=0,02 кг/с и $\omega_{м.\,п.}$ =0,4 м/с. Максимальное значение скорости сушки (0,17 %/мин) достигалось при максимальной температуре $T_п$=142,9°С, $G_з$=0,02 кг/с и $\omega_{м.\,п.}$=1,6 м/с. Скорость сушки приближена к конвективным сушилкам.

Существенное влияние на коэффициент теплоотдачи имеет скорость зернового потока. Рост скорости зернового потока в 3 раза приводит к повышению коэффициента теплоотдачи на 40 %. Скорость сушки определяется сочетанием температуры поверхности, скорости потока и скоростью воздуха в межзерновом пространстве.

В результате обобщения экспериментальных данных получены коэффициенты уравнений в числах подобия для определения степени смешивания, коэффициента массоотдачи, времени сушки. Приведены результаты компьютерного моделирования, оптимизации блочной сушильной установки, предложения к внедрению. В ходе компьютерного моделирования диапазон температур зернового потока, давления в модуле термосифона, скоростей воздуха выходит за пределы экспериментальных значений. Проведено компьютерное моделирование продолжительности процесса сушки, процесса массоотдачи, энергозатрат на сушку при различных режимных параметрах установки.

Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования показывают, что энергозатраты блочной зерносушилки 2,8…3 МДж/кг. Энергозатраты ниже существующих конвективных сушилок.

По результатам компьютерного моделирования разработан экспериментальный образец блочной сушильной установки с полной рециркуляцией теплоносителя. Основные его элементы:

шахта, воздухопроводы, термосифонный модуль. Теплообменные трубки выполнены с наклоном. Угол наклона теплопередающих труб 60°. Разработан проект модернизации зерносушилки ДСП-12 на предложенную схему работы. В блочной зерносушилке такой же производительности энергозатраты ниже на 30 %, время сушки на 10 %.

Проведена оценка влияния технических характеристик новой системы зерносушения на прибыль, которая может быть получена при ее внедрении. Исходными данными для расчетов являлись режимные характеристики системы, компоновочные, стоимостные параметры. Расчет проведен для ДП "Гайсинский комбинат хлебопродуктов" ОАО «Концерн Хлібпром». Разработана блочная зерносушилка, производительностью 12 т/ч. Дополнительные капитальные затраты составят 56680 грн., которые окупятся на протяжении 3 сезонов.

**Ключевые слова:** сушка, блочная зерносушилка, коэффициент массоотдачи, термосифон.

## ANNOTATION

Donkoglov V. I. Working out of block grain dryer on the basis of independent evaporation – condenser systems. - Manuscript.

Dissertation on gaining of scientific degree of candidate of engineering sciences by specialty 05.18.12 – processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical productions.

Odessa national academy of food to technology of Department of education and science of Ukraine, Odessa, 2010.

The dissertation work is devoted to creation of block grain dryer, working out of methods of it calculation.

Analytical and experimental researches have confirmed, that block grain dryer provides ecologically pure drying of grain, low power inputs.

The design of block grain dryer, the mechanic is investigated at flow grain of thermosiphon; fields of speeds, braking degree of grain layer are defined.

The overall performance of inclined thermosiphons is proved and confirmed.

The corner of an inclination of heat-transfer pipes 60 ° guarantees effective hashing of a grain layer and increase heat emission to a grain stream.

Influence of speed of a grain stream on factor of heat-transfer is defined.

The mathematical description of kinetic drying, model in numbers of similarity for definition of specific power inputs on drying is received.

The engineering technique and the computer program for calculation of block grain dryer is developed.

Computer modelling of process of drying in block grain dryer is spent. The project of the scientif-

ic and technical documentation on block grain dryer is developed.

**Keywords:** drying, block grain dryer, thermosiphon, factor of mass-transfer.

Підписано до друку 29.10. 2010 р. Формат 60×90/16. Об'єм 0,9 умовн. друк. арк.
Замовлення № 47. Тираж 100 прим.

ОНАХТ, вул. Канатна, 112, м. Одеса, 65039