

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗИКОВ ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК 664:621.1.016

**ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНІ СХЕМИ І АПАРАТИ З
ТЕРМОСИФОНАМИ ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ ЗЕРНА**

Спеціальність 05.18. 12 – процеси і обладнання харчових
мікробіологічних та фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Одеса – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

- Науковий керівник: –доктор технічних наук, професор
Бурдо Олег Григорович,
Одеська національна академія харчових технологій,
завідувач кафедри процесів та апаратів
- Офіційні опоненти: –доктор технічних наук, доцент
Погожих Микола Іванович,
Харківський державний університет харчування та торгівлі
завідувач кафедри фізики і енергетики
- кандидат технічних наук, доцент,
Титар Сергій Семенович,
Одеський національний політехнічний університет,
професор кафедри теплових електричних станцій та
енергозберігаючих технологій.
- Провідна установа: –Національний університет харчових технологій, кафедра
процесів і апаратів харчових виробництв та технології
консервування, Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться 18 грудня 2003 р. о 10-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 41.088.01 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: 65039, м.
Одеса-39, вул. Канатна, 112.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії харчових
технологій за адресою: 65039, м. Одеса-39, вул. Канатна, 112.

Автореферат розісланий 17.11.2003 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

Гапонюк О. І.

Актуальність теми. Для сучасного зерносушіння характерні дві проблеми: енергетика і екологія. Витрати енергії на зерносушіння вищі, ніж енерговитрати при виробництві зерна. Тому потрібно шукати резерви зниження енергетичних витрат в зерносушінні. В Україні як сушильний агент використовують суміш топкових газів і повітря. Безпосередній контакт продуктів згоряння із зерном погіршує його якість в зв'язку з можливим проникненням в продукт канцерогенних компонентів. Задачами вдосконалення сушильних технологій є: зниження енергетичних витрат на видалення вологи, забезпечення екологічної безпеки продукту, що висушується, розробка високоефективної зерносушильної техніки. Процеси сушіння безперервно удосконалюються. Однак, можливості зниження витрат палива на сушіння не вичерпані і тут є резерви. Основний резерв зниження енергоспоживання при сушінні зерна в цей час міститься в раціональному способі рециркуляції теплоносія. Досвід застосування в світовій практиці теплових труб і термосифонів (ТС) дозволяє розраховувати на можливість створення на їх базі енергоефективних і екологічно безпечних апаратів для термообробки зерна. Тому, розвиток наукових уявлень про механізми тепло-масообміну в апаратах з ТС і створення на їх основі методик розрахунку і оптимізації сушарок і систем зберігання зерна є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана згідно з госбюджетною тематикою науково-дослідних робіт (Виробництво, переробка і збереження сільськогосподарської продукції (№ 0100U4572).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є створення енергоефективних і екологічно безпечних схем установок для термообробки зерна і методів їх розрахунку.

Виходячи з мети, формулюються такі задачі досліджень:

- запропонувати та обґрунтувати нові принципи термообробки (нагріву та сушіння) зерна;
- розробити математичну модель комбінованої зерносушильної установки;
- розробити методики експериментальних досліджень механіки руху зернового шару і теплообміну в шарових термосифонних апаратах;
- провести експериментальні дослідження механіки обтікання зерном труб і їх пучків, а також локальної і середньої тепловіддачі від труб до рухомого шару зерна;
- провести узагальнення експериментальних даних і розробити інженерну методику та комп'ютерну програму розрахунку і оптимізації зерносушарки;
- створити схему блокової зерносушарки і обґрунтувати її техніко-економічні показники.

Об'єктом дослідження є апарати з ТС для термообробки зерна.

Предметом дослідження є енергетична ефективність і процеси тепломасообміну в сушильній установці.

Методи досліджень. При експериментальному моделюванні термосифонного підігрівача

зерна застосовувався метод міченого шару, відеозйомка, калориметрування. Результати оброблялися методами теорії подібності. Аналітична модель сушильної шахти послідовно розвинуто з моделі тонкого шару в моделі щільного шару і всієї шахти. Енергетична ефективність визначено на основі системного аналізу установки. Оптимізація режимних і конструктивних параметрів установки проведена варіаційним методом.

Наукова новизна отриманих результатів.

Доведене наукове положення роботи – “Комбінування кондуктивного підігрівання зерна (за допомогою випарно-конденсаційних систем енергопідводу) і конвективної сушки при глибокій рециркуляції теплоносія дає можливість створити енергоефективну сушарку, яка гарантує екологічну чистоту зерна. Мінімізація питомих витрат сушарки досягається шляхом системної оптимізації і визначення вдалого поєднання: конструктивно-компоновочних параметрів модулів; температури і витрат теплоносія; температури, витрат і кратності рециркуляції сушильного агента”. При цьому:

- встановлена специфіка обтікання шаром зерна поверхні труб і отримано рівняння для обчислення коефіцієнта теплопередачі від поверхні ТС до щільного зернового шару;
- доведено, що використання сучасних засобів організації теплопередачі (ТС) дає можливість розробляти принципово нове обладнання для термообробки зерна;
- дано розвиток модельним уявленням про кінетику сушіння та складена система математичних моделей, що дозволяє дати кількісну оцінку кінетиці сушки, технічним і економічним показникам сушильних установок;
- розроблена концепція побудови алгоритму розрахунку і оптимізації блокових зерносушарок з ТС.

Практичне значення отриманих результатів.

Алгоритми розрахунку і пакети прикладних програм на ЕОМ, що реалізують розроблені алгоритми, можуть застосовуватися для проектування блокових зерносушарок з термосифонними модулями. Запропонована програма дозволяє визначати техніко-економічні характеристики блокової зерносушарки в залежності від режимних і конструктивних параметрів. Окремі модулі програми можуть бути використані для оптимізації діючих конвективних сушильних установок різного призначення для рішення задач підвищення енергоефективності і розрахунку полів температур і вологовмісту зернового потоку. Пріоритет нового способу захищен автором матеріалами заявки на винахід “Блочна зерносушарка” (МПК 7F26B 17/10, №200112834 від 20.11.01)

Проект блокової зерносушильної установки, продуктивністю 6 т/г, передано для виробництва дослідного зразка на Київському експериментальному механічному заводі тепломасообмінних апаратів (акт впровадження від 10 грудня 2002 р).

Особистий внесок претендента полягає в формулюванні і доказі наукових положень дисертації, розробці комплексної моделі блокової зерносушильної установки з шаровим підігрівачем, постановці та проведенні комплексних експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання, проведенні заходів щодо впровадження результатів наукових досліджень в практику, формулюванні висновків і підготовці до публікації результатів досліджень. На окремих етапах роботи в ній брали долю співробітники, аспіранти і докторанти ОДАХТ.

Положення опублікованих в співавторстві з колегами і використаних в дисертації статей належать автору на основі рівноправного партнерства.

Випробування результатів дисертації. Головні результати теоретичних і експериментальних досліджень включалися в програми, докладалися і дістали позитивну оцінку на: Науково-практичній конференції “Современные энергосберегающие технологии (сушка и термовлажностная обработка)” (Москва 2002); другій Міжнародній конференції “Industrial heat engineering” (ИТТФ, Київ 2001); Науково-практичній конференції “Регіональні проблеми енергозбереження в децентралізованій енергетиці” (Київ 2000 р.); шостій Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми та перспективи створення та впровадження нових ресурсо- та енергоощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості” (Київ УГУПТ 2000); XVII Міжнародній науковій конференції “Inzyneria procesowa w ochronie srodowiska” (Opole Otmuchow 1999); Міжнародному форумі “Тепломассообмен ММФ-2000” (Мінськ АНК “Інститут тепло- і массообмена ім. А. В. Ликова” НАНБ); X Міжнародній конференції “Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв” (ICSE-99-Львів); Міжнародній науково практичній конференції “Регіональні проблеми енергозбереження у виробництві і споживанні енергії” (Київ 1999); Науково-практичній конференції “Енергоефективность - 2002” (Київ 2002); 4- му Мінському міжнародному семінарі “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators” (Minsk, Belarus, 2000); III Міжнародній науково практичній конференції “Хлібопродукти 2000” (Одеса 2000); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ОГАПТ (1998..2003).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 16 наукових працях, в тому числі в збірниках наукових робіт - 5, в матеріалах конференцій - 7 і в тезах конференцій - 4.

Структура та обсяг роботи: Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Викладена на 179 стор., містить 66 рисунків на 58 стор., 12 таблиць на 10 стор., список використаних джерел з 146 найменувань на 14 стор., 5 додатків на 17 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів.

В першому розділі проаналізовано стан та напрями удосконалення техніки термообробки зерна, враховано світовий досвід розвитку енерготехнологій. Позначені основні проблеми в процесах термообробки зерна. Систематизовано роботи по енергозбереженню, обґрунтовано дві групи методів підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів в сушильній техніці: - теплотехнологічні (що стосуються сушильної установки загалом) і кінетичні. Розглянуто методи розрахунку процесів тепломасопереносу в зернових технологіях.

Аналіз шляхів комплексного вирішення проблем енергетики та екології виявив, що ТС є ефективними, перспективними теплопередаючими елементами. Можна очікувати позитивний ефект від впровадження ТС в схеми утилізації теплоти відпрацьованих газів зерносушильних установок. Запропоновано нові, оригінальні технічні рішення використання двофазних теплопередаючих елементів для інтенсифікації процесу, спрощення конструкції, поліпшення екології і умов експлуатації. На основі цих рішень розроблено схему екологічно безпечної енергоефективної блочної зерносушарки (рис. 1.), яка складається з шарового підігрівача 2, сушильної шахти 3, термосифонного калорифера 4. Суміш енергоносія з топковими газами поступає в газохід 1, в якому розташовані випарники (5) ТС. Конденсаційні дільниці (6) ТС розташовані в шаровому підігрівачі зерна. Частина енергії суміші через ТС передається зерну, що рухається щільним гравітаційним шаром крізь шаровий підігрівач в зону сушіння. Потім теплоносій поступає в термосифонний повітропідігрівник, де здійснюється нагрів повітря до температури сушіння. Нагріте повітря поступає в сушильну шахту, де здійснюється сушіння зерна. Шахта є традиційною конвективною зоною з шаром зерна, що продувається. Відпрацьований теплоносій розділяється на два потоки. Більша частина йде на рециркуляцію, а менша частина викидається в довкілля.

Методи розрахунку таких конструкцій відсутні. Необхідно провести дослідження для розробки методів розрахунку і оптимізації таких апаратів.

У другому розділі проведено аналіз зерна та зернової маси як об'єктів досліджень. Розроблена математична модель блокової зерносушарки що зв'язує послідовно модель розрахунку температури і вологовмісту в зернівці, модель щільного шару, модель сушильної шахти. Модель тонкого шару являє собою модель сушіння "середньої" зернівки (рис. 2) що складається з трьох зон. Передбачається, що кожна зона характеризується однаковою температурою і вологовмістом. Випаровування вологи відбувається з 3-ї (зовнішньої) зони.

Тепломасообмін між зернівкою і сушильним агентом визначений як:

$$\frac{\partial W_3}{\partial \tau} = \frac{B_2}{\rho_3 n \tau_3} (W_2 - W_3) + \frac{\beta S_{y0}}{\rho_3 n_3} (p_n - p_{n3}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial \tau} = -S_{y0} \frac{q + q_m \cdot r}{\rho_3 (c_{p3} + X c_{pe})} = \frac{-\alpha S_{y0} (T_3 - T_a) - \beta S_{y0} (p_n - p_{n3}) r}{\rho_3 (c_{p3} + X c_{pe})} \quad (2)$$

а внутрішній масоперенос в зернівці:

$$\frac{\partial W_1}{\partial \tau} = \frac{B_1}{\rho_3 n_1} (W_2 - W_1) \quad \frac{\partial W_2}{\partial \tau} = \frac{B_1}{\rho_3 n \tau_{22}} (W_1 - W_2) + \frac{B_2}{\rho_3 n_2} (W_3 - W_2) \quad (3)$$

де W - вологовміст зерна у відповідній зоні, B -коефіцієнт дифузії, n - відносний об'єм відповідної зони, ρ_3 -густина зернівки, p_n - парціальний тиск водяної пари в повітрі, p_{n3} - парціальний тиск водяної пари над поверхнею зернівки, r - питома теплота пароутворення, c_{p3} - теплоємність зерна, q - потік теплоти, q_m - потік маси, S_{y0} - питома поверхня зернівки, X - вологовміст сушильного агента, T_3 -температура зерна T_{ca} -температура сушильного агента, α -коефіцієнт тепловіддачі, β -коефіцієнт масовіддачі, τ -час.

Товстий шар представляємо послідовністю елементарних шарів симетричних відносно напрямку рушення сушильного агента. Параметри сушильного агента визначаються по рівняннях:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -w_{ca} \frac{\partial x}{\partial z} + q_m S_{y0} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \quad \frac{\partial T_{ca}}{\partial \tau} = -w_{ca} \frac{\partial T_{ca}}{\partial z} + S_{y0} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{q_m c_{pn} (T_3 - T_{ca}) + q}{\rho_{ca} (c_{ca} + x \cdot c_{pn})} \quad (4)$$

де z -лінійна координата уздовж напрямку руху сушильного агента, w -швидкість руху сушильного агента, ε -пористість шару зерна.

Зерносушарка в цілому представляється як послідовність товстих шарів із проточним і протиточним рухом сушильного агента.

Для шарового підігрівача з ТС розроблено двокомпонентну модель тепло переносу в основі якої принципи, запропоновані В.О. Календерьян:

- на конденсаційних дільницях ТС:

для зерна

$$G_3 c_{P3} \frac{dt_3}{dz} - \alpha_{B3} (t_B - t_3) F_K \varepsilon_V = \frac{N_T}{V_{Я}} F_K F_H (t_H - t_3) \frac{1}{\frac{1}{\alpha_3} + \frac{1}{\alpha_K}} \quad (5)$$

для повітря

$$G_6 c_{P6} \frac{dt_6}{dz} - \alpha_{B3} (t_B - t_3) F_K \varepsilon_V = \frac{N_T}{V_{Я}} F_K F_H (t_H - t_3) \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{KB}} + \frac{1}{\alpha_K}} \quad (6)$$

- на випарній дільниці ТС для газу:

$$G_{\Gamma} c_{P_{\Gamma}} \frac{dt_{\Gamma}}{dz} = \frac{N_T}{V_{Я\Gamma}} F_{Я\Gamma} F_K (t_H - t_H) \frac{1}{R_{\Gamma H}}$$

де - $R_{\Gamma H} = \alpha_2^{-1} + R_1 + R_2 + \alpha_u^{-1}$ загальний термічний опір ТС, G_B – витрати повітря G_3 – витрати зерна, G_{Γ} – витрати газу, F_K – поверхня конденсатора, F_H – поверхня випарника, $F_{Я\Gamma}$ – поверхня дільниці, N_T – кількість ТС, $V_{Я}$ – об'єм дільниці з зерновим шаром, $V_{Я\Gamma}$ – об'єм дільниці з газовим потоком.

На основі методу аналізу розмірності отримано критеріальне рівняння для визначення коефіцієнту тепловіддачі від поверхні ТС до зернового шару.

$$\frac{\alpha D}{\lambda} = \left(\frac{\omega d_3}{a} \right)^{k_1} \cdot \left(\frac{D}{d_3} \right)^{k_4} \cdot \left(\frac{S_1}{D} \right)^{k_6} \cdot \left(\frac{S_2}{D} \right)^{k_7} \quad (7)$$

де $\frac{\alpha D}{\lambda} = Nu$, - число Нусельта $\frac{\omega d}{a} = Pe$ – число Пекле, $\frac{D}{d_3}$, $\frac{S_1}{D}$, $\frac{S_2}{D}$ - безрозмірні симплекси.

Для визначення невідомих коефіцієнтів критеріального рівняння (8) проведено комплекс експериментальних досліджень. Інтенсивність тепловіддачі при руху шару у поверхні ТС в значній мірі визначається механізмом обтікання. Тому дослідження цього механізму дозволить встановити діапазони параметрів, що варіюють, при експериментальному вивченні тепловіддачі, визначити раціональні для постановки дослідів параметри пучків ТС. Для проведення експериментальних досліджень були розроблені методики експериментів і експериментальні установки, проведена оцінка погрешностей.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень механіки руху та локального і середнього теплообміну поверхні ТС. з зерновим шаром.

Були взяті чотири найбільш характерні профілі труби: круглий, плоский, трикутний і еліптичний. По характеру викривлення міченого шару і розміру і розташуванню повітряного мішка якісно оцінювався характер обтікання (рис.3).

Аналіз картин (рис.3) показав, що найкраща тепловіддача до зернового шару повинна

спостерігатися від труб овального перетину. Але, враховуючи технологічність виготовлення, подальші дослідження і узагальнення результатів проводилося для труб круглого перетину, які виготовляються серійно. Внаслідок обробок картин (як на рис.3) отримані значення локальних швидкостей (рис 4), щільності і міри гальмування зернового шару

На основі досліджень пучка ТС, що обтікаються шаром зерна встановлено, що значення локальних характеристик швидкості рушення шару, міри гальмування і його приведений щільності не співпадають по кутовій координаті, що не дозволяє однозначно визначити навіть якісний характер локальної тепловіддачі від циліндричної поверхні.

На основі дослідження середньої тепловіддачі від поверхні ТС встановлено, що залежність від швидкості рушення зернового шару w має максимум при діаметрі (D) ТС рівному

$$D_{кр} = 1,21 \cdot w^{0,05}$$

За результатами досліджень середньої тепловіддачі від поверхні ТС до зернового шара визначені коефіцієнти критеріального рівняння

$$\text{При } D < D_{кр} \quad Nu = 2,59 Pe^{0,11} (D/d_3)^{0,59} (S_1 S_2 / D^2)^{-0,2} \quad (8)$$

$$\text{При } D \geq D_{кр} \quad Nu = 3,25 Pe^{0,17} (D/d_3)^{0,22} (S_1 S_2 / D^2)^{-0,2} \quad (9)$$

У четвертому розділі наведені інженерні методики розрахунку апаратів з ТС для термообробки зерна і блочної зерносушарки в цілому.

Модель блокової зерносушарки представлено як сукупність окремих модулів з відповідними зв'язками між ними. Проведена декомпозиція загальної задачі моделювання установки на ряд приватних задач моделювання окремих модулів. Диференційні рівняння, що описують математичні моделі, перетворені в різницеві для реалізації на ЕОМ.

Методика розрахунку зерносушарки передбачає розрахунок шарового підігрівача, розрахунок калорифера, розрахунок сушильної шахти, розрахунок витрати повітря і палива в теплогенераторі і розрахунок техніко-економічних показників. Розрахунок калорифера засновувався на процедурі порядного розрахунку аеродинаміки і теплопередачі в апараті. Метою розрахунку є визначення взаємозв'язку режимних і конструктивних параметрів. Структура розрахунку конвективної сушильної шахти передбачає розрахунок властивостей і швидкостей зерна і сушильного агента, розрахунок дискретизації за часом і висотою шару, розрахунок полів температур і вологовмістів в сушильній установці. Величина кроку дискретизації за часом, що забезпечує прийнятну точність обчислень і швидкість розрахунків лежить в діапазоні 0.1... 1с.

Розроблені схеми і програми їх розрахунку дозволяють провести проектні і перевіірочні

розрахунки блокової зерносушарки, провести розрахунок систем теплоутилізації діючих зерносушарок і проводити оптимізацію зерносушарок.

Порівняння результатів розрахунку за розробленою програмою з даними випробувань термосифонного калориферу у виробничих умовах та з літературними джерелами на сушарці ДСП-320Т показало, що в першому випадку різниця не перевищувала 10%, а в другому 5%.

п'ятому розділі наведені загальні задачі оптимізації блокової сушарки і розроблена поетапна програма її комплексної оптимізації. На першому етапі досліджуються конструкції і режими роботи шарового підігрівача, на другому термосифонного калорифера. На третьому етапі досліджуються режими роботи теплогенератора і рециркуляція сушильного агента. Варіаційні розрахунки по цих етапах дозволяють мінімізувати енерговитрати і оцінити техніко-економічні показники різного компонування і режимів роботи блокової зерносушильної установки.

Внаслідок досліджень шарового підігрівача раціональне співвідношення між випарниками і конденсаторами становить 1/7. Збільшення подовжнього і поперечного кроку між ТС негативно позначається на техніко-економічних характеристиках установки. Вплив числа ТС і їх компонування на економічні показники неоднозначно залежить від температури і витрати теплоносія. Однак за результатами досліджень можна визначити діапазони параметрів до яких проводити оптимізацію установки загалом.

Найбільш економічними для розробленої установки є калорифери з довжиною ТС $H=2\text{м}$ (рис. 7).

Розраховані поля температур і вологовмісту в сушильній шахті (рис.8).

Рециркуляція сушильного агента впливає значний чином на техніко-економічні показники роботи сушарки, але ступінь рециркуляції визначається витратами сушильного агента (рис 9). Так, при збільшенні витрат сушильного агента з $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$ до $8,3 \text{ м}^3/\text{с}$ ККД збільшується на 8%, при цьому ступінь рециркуляції збільшується майже вдвічі (з 45% до 92%).

Використовуючи розроблену структуру, проведена варіаційна оптимізація режимів роботи і конструктивних параметрів блокової зерносушильної установки. Аналіз різних варіантів приведений на рис. 10.

У результаті отримані конструктивні і режимні параметри, що забезпечують мінімальний термін окупності установки при її ККД = 60% (варіант 3). Подальше підвищення ККД можливе при значному збільшенні капітальних витрат (варіант 4).

Узагальнення результатів варіаційної оптимізації з рециркуляцією сушильного агента приведено на рис 10.

Варіант	200/60 ₁	200/73 ₂	200/92 ₃	200/114 ₄	200/99 ₅	200/106 ₆	200/112 ₇	200/125 ₈	200/129 ₉
Температура теплоносія / с.а. °С									
Рециркуляція с.а. %									
Витрати палива КД	6,97	6,21	5,24	4,66	4,29	4,99	4,80	3,59	5,32
Кількість ТС в капітальні / калорифері, шт.	74800	24420	31680	92400	20900	20900	20900	107800	34100
Вартість закупності теплоносія / с.а. м³/с	130/600	120/102	130/208	140/700	120/120	120/120	120/120	140/900	120/240
Вартість	9,00	1,69	1,41	3,42	0,95	0,86	0,81	3,02	1,57
Вартість теплоносія / с.а. м³/с	8,8/3	5/5	3,3/3	2,5/2	3,3/5	3,3/5	3,3/5	5/2	3,3/5

Рис 10.. Результати варіаційної оптимізації зерносушарки з рециркуляцією сушильного агента.

У результаті отримані конструктивні і режимні параметри, що забезпечують мінімальний термін окупності установки при її ККД = 70% (варіант 7). Подальше підвищення ККД можливе при значному збільшенні капітальних витрат (варіант 8).

ВИСНОВКИ

1. Сучасними проблемами термообробки зерна є енергетика і екологія. Екологічні проблеми пов'язані з традиційним в Україні використанням в якості сушильного агента суміші топкових газів з повітрям. Підвищена витрата палива (в 2..4 разу більш фізично необхідного) пояснюється як історичними передумовами так і відсутністю методів системної оптимізації енерготехнологій зерносушіння, інженерні методи розрахунку установок засновуються, як правило, на результатах експериментального дослідження і мають приватний характер.

2. Світова практика використання автономних теплопередаючих модулів (теплових труб і термосифонів) показує їх перспективність для організації ефективного енергопідводу. У роботі доведена можливість вдосконалення теплотехнологій в зернопереробці на основі двофазних ТС. Запропоновані принципово нові схеми кондуктивного шарового термосифонного підігрівача зерна, регенератора теплоти зернових потоків.

3. Комбінування кондуктивного підігрівання зерна і конвективного сушіння його повітрям, використання двофазних ТС в шаровому підігрівачі, калорифері і утилізаторі дозволило забезпечити безпечно сушіння зерна при зниженні споживання палива.

Ефект досягається за рахунок глибокої рециркуляції теплоносія (продуктів згорання), рециркуляції сушильного агента, теплоутилізації.

4. Використання в зерносушінні принципово нового елемента шарового підігрівача зажадало комплексних аналітичних і експериментальних досліджень механіки обтікання гравітаційним щільним шаром пучків ТС, локальної і середньої тепловіддачі до зерна.

5. Механіка обтікання щільним гравітаційним шаром зерна поверхні ТС специфічна, відрізняється від картин обтікання труб рідиною, визначається швидкістю потоку, діаметром і компонуванням ТС. Швидкість потоку надає менше значення на картини обтікання, ніж діаметр

ТС. Граничні значення локальних швидкостей потоку, міри гальмування шару і його приведеної щільності не співпадають по кутовій координаті.

6. Значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі від ТС до зерна лежать в межах 10.. 110 Вт/м²К. Найбільші значення α досягаються при кутовій координаті $\gamma=45^\circ$, а найменші при $\gamma=180^\circ$. Значення отримані в діапазоні швидкостей шару від 4 до 70 мм/с

7. Середні значення коефіцієнта тепловіддачі ростуть з підвищенням швидкості шара $\alpha=65$ Вт/м²К при $w=2$ мм/с, і $\alpha=105$ Вт/м²К при $w=45$ мм/с. Вплив діаметра досить специфічний: спочатку із зростанням D спостерігається підвищення α , а потім спостерігається зниження інтенсивності тепловіддачі. Причому, максимум α із зростанням w зміщується у бік більших значень D . Специфіка середньої тепловіддачі враховується моделлю (8, 9)

8. Синтез моделі конвективної сушильної установки на основі моделі сушки “середнього” зерна, що послідовно розвивається в модель щільного шару і модель установки загалом дозволяє скласти процедуру варіаційної оптимізації параметрів зерносушарки.

9. Установка термосифонних утилізаторів на шахтних зерносушарках дає економію палива від 7,5 до 20% в залежності від типу установки. Термін окупності робіт в межах року.

10. Проведена варіаційна оптимізація блокової зерносушильної установки і знайдені конструктивні і режимні параметри, що забезпечують ККД установки 70% і витрату дизельного палива 4,8 кг/т.

Істотним резервом підвищення енергоефективності є рециркуляція сушильного агента. Представлені компоновочні варіанти, що забезпечують підвищення ККД до 80%.

8. Розроблена програма підвищення енергоефективності може бути використана для широкого впровадження на діючих зерносушарках, як при переведенні їх на комбінований кондуктивно-конвективний спосіб сушіння, так і оптимізації систем теплоутилізації, зокрема схем рециркуляції відпрацьованого сушильного агента. Програма визначає поля температур і вологовмістів в сушильній шахті, технічні і економічні параметри установки.

12. Розроблена блокова зерносушарка, продуктивністю 6 т/г, з термосифонними шаровим підігрівачем зерна і теплогенератором забезпечує екологічно безпечну технологію сушіння при витратах 5,2 кг дизельного палива на 1т зерна. Термін окупності витрат, пов'язаних з установкою ТС, складає 0,9 року. Зерносушарка впроваджується на Київському експериментальному механічному заводі тепломасобмінних апаратів (акт впровадження від 10.12. 2002 р).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бурдо О.Г., Гайда С., Зыков А.В., Саламаха В.И., Этапы энергосбережения на предприятиях южного региона. // Перспективные направления развития экологии экономики энергетики – ОЦНТИ Одесса 1999 с.319-324

Автором обґрунтовуються перспективи нових схем апаратів з термосифонами для вирішення енергетичних і екологічних проблем харчових виробництв.

2. Бурдо О.Г., Терзієв В.Г., Зиков О.В., Гайда С. Науково-методологічні аспекти енергозбереження у харчових технологіях.//Вісник Державного університету “Львівська політехніка” Проблеми економії енергії №2- Львів-1999-с.25-28.

Автор приймав участь в розробці ієрархічної моделі трансформації енергії в зерносушарці та методах системного аналізу енерготехнологій.

3. Развитие техники послеуборочной термообработки зерна./ Зыков А.В., Саламаха В.И., Безбах И.В., Амор А. //Перспективные направления развития экологии, экономики, энергетики.-Одесса-1999-с.51-55

Автором пропонується використання термосифонів для передачі теплоти від топкових газів до зерна, приведено порівняння результатів виробничого випробування термосифонного калорифера з розрахунками на ЕОМ.

4. Гайда С. Заков А.В. Айда Амор. Утилизация тепла в сушильных установках.// Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій / Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2001. Вип.. 21. С. 52-55.

Приведено розрахунки техніко-економічних характеристик систем тепло утилізації шахтних зерносушарок;

5. Бурдо О.Г., Зиков О.В., Гайда С. Нові принципи термообробки зерна. // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій / Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 1999. Вип.. 20. С. 223-229.

Приведено схеми апаратів з термосифонами для термообробки зерна, аналітичну модель шарового підігрівача зерна, результати дослідження теплообміну між поверхнею труб та зерновим шаром, результати розрахунків елементів блочної зерносушарки (шарового підігрівача, термосифонного калорифера)

6. “Новітні теплотехнології в харчових виробництвах” Захаров М.Д. Бурдо О.Г., Зиков О.В., Мілінчук С.І //Вісник державного університету “Львівська політехніка” Львів-1999.

Автором приведено порівняння результатів виробничого випробування термосифонного утилізатора на зерносушарці ДСП-320Т з розрахунками на ЕОМ;

7. “Експлуатаційна надійність теплоутилізаційної апаратури при сушінні харчових продуктів” Станевський О.Л. Зиков О.В. Саламаха В.І. Айда Амор // Обладнання та технології харчових виробництв – Тематичний збірник наукових праць. Донецьк-1999

Пропонується методика оптимізації режимів роботи теплоутилізаторів.

8. Бурдо О.Г. Зыков А.В. Гайда С. Теплообмен зернового потока в слоевых рекуператорах // Сборник докладов “Тепломассообмен ММФ-2000” Минск АНК “Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова” НАНБ. Минск –2000. С. 193-197.

Приведено аналітичну модель шарового підігрівача, результати досліджень механіки руху та локального і середнього теплообміну зернового шару з поверхнею труб і їх аналіз.

9. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Зыков А.В., Милинчук С.И. Пути решения проблем энергетики и экологии в пищевых технологиях.// XVII Miedzynarodowa Konferencja Naukowa z cyklu: Inzynieria procesowa w ochronie srodowiska.- Opole-1999.-p.33-36.

Показано пріоритетність використання апаратів з термосифонами для тепло утилізації в сушильних процесах.

10. Гайда С. Зыков А.В. Безбах И.В. “Технико экономические аспекты энергосбережения в зерносушении” XVII Miedzynarodowa konferencja naukowa “Inzynieria procesowa w ochoronie srodowiska” Opole Otmuchow 1999

Приведено розрахунки техніко-економічних характеристик систем тепло утилізації.

11. Пути 5 совершенствования теплотехнологий сушки в АПК. Будро О.Г., Терзиев С.Г., Зыков А.В., Безбах И.В.//Труды Международной научно-практической конференции “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)” .М.:МГАУ 2002.

Приведено результати техніко-економічної оптимізації тепломасоутилізаторів та конструктивних розрахунків блочної зерносушарки.

12. Гайда С. Зыков А.В. Безбах И.В. “Совершенствование сушильной техники в АПК” // Сборник материалов научно-практической конференции “Региональные проблемы энергосбережения в децентрализованной энергетике” Киев 2000г.

Запропоновано двокомпонентну модель шарового підігрівача та програму розрахунку блочної зерносушарки .

13. “Дослідження апаратів для термообробки зерна” Бурдо О.Г., Зиков О.В., Безбах И.В., Саламаха В.І //тези доповідей X міжнародної конференції “Вдосконалення процесів та апаратів хімічних та харчових виробництв” (ІССЕ-99)-Львів-99

Приведено аналіз механіки обтікання поверхні труб зерновим шаром. Запропоновано використання отриманих результатів для проектування екологічно безпечних, енергозощаджуючих сушарок.

14. Burdo O.G., Terziev S.G., Zykov A.V. “Optimization of the heat pipes heat and mass recoverer” //4-th Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators” (Minsk, Belarus, 2003) p. 161-166

Приведена методика і результати оптимізації термосифонних теплоутилізаторів.

15. Механіка руху та теплообмін шару зерна з поверхнею труб. Бурдо О.Г. Саламаха В.І Гайда С. Зиков О.В.// Шоста міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми та перспективи створення та впровадження нових ресурсо- та енергозощадних технологій, обладнання в галузях харчової і переробної промисловості” Київ УДУХТ 2000. Тези доповідей.

Приведено аналіз механіки обтікання поверхні труб зерновим шаром та аналіз локальної тепловіддачі від поверхні труби до зернового шару.

16. Приоритетные направления энергосбережения в пищевых тепло технологиях./Захаров Н.Д., Бурдо О.Г., Зыков А.В., Милинчук С.И. //Международная научно-практическая конференция “Региональные проблемы энергосбережения в производстве и потреблении энергии” - Киев-1999-с.99-100

Запропоновано використання комп'ютерних технологій для проектування і оптимізації систем тепло утилізації

АНОТАЦІЯ

Зиков О.В. Екологічно безпечні схеми та апарати з термосифонами для термообробки зерна. – 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, Одеса, 2003.

Дисертація присвячена проблемі теоретичного і експериментального обґрунтування напрямлення створення екологічно безпечних і енергоефективних засобів для термообробки (нагріву та сушіння) зерна, створенню методів оптимізації зерносушильної техніки. У результаті експериментального і теоретичного моделювання обґрунтовані можливості застосування термосифонів для підвищення ефективності зерносушильної техніки. Запропоновано новий комбінований (конвективно-кондуктивний) спосіб сушіння, який забезпечує екологічну безпеку та енергетичну ефективність сушіння. Розроблено математичну модель блочної зерносушарки на основі якої створено інженерну методику розрахунку і програму її оптимізації. Проведена варіаційна оптимізація блокової зерносушильної установки і знайдені конструктивні і режимні параметри, що забезпечують ККД установки 70%. Розроблена програма підвищення енергоефективності може бути використана для широкого впровадження на діючих зерносушарках.

Ключові слова: термосифон, зерносушарка, математичне моделювання, теплообмін, оптимізація.

АННОТАЦИЯ

Зиков А.В. Экологически безопасные схемы и аппараты с термосифонами для термообработки зерна. - 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, Одесса, 2003.

Диссертация посвящена проблеме теоретического и экспериментального обоснования

направления создания экологически⁷ безопасных и энергоэффективных средств для термообработки (нагрева и сушки) зерна, созданию методов оптимизации зерносушильной техники.

В результате экспериментального и теоретического моделирования обоснованы возможности применения двухфазных теплопередающих модулей (ТС) для повышения эффективности зерносушильной техники. Предложен новый комбинированный (конвективно-кондуктивный) способ сушки. Сушильная установка, реализующая данный способ сушки содержит конвективную сушильную шахту, термосифонный слоевой подогреватель зерна и термосифонный калорифер. Экологическая безопасность сушки достигается за счет отсутствия непосредственного контакта продуктов сгорания с зерном, а экономическая эффективность достигается за счет глубокой рециркуляции сушильного агента. Модель слоевого подогревателя представлена как двухкомпонентная модель теплообмена между термосифонами и дискретной системой “воздух-зерно”, которая омывает ряд ТС. Для каждого компонента описание теплоотдачи проведено как для сплошной среды. Модель сушильной шахты связывает последовательно модель расчета температуры и влагосодержания в зерновке, модель плотного слоя, модель сушильной шахты. Модель тонкого слоя представляет собой модель сушки “средней” зерновки. Исследования механики обтекания плотным слоем зерна поверхности ТС проведены методом “меченого слоя” при помощи видеосъёмки. В результате обработки полученных картин обтекания определены локальные значения скоростей, плотностей и степеней торможения слоя. Исследование локального теплообмена проведено в диапазоне скоростей слоя от 4 до 70 мм/с. Значения локальных коэффициентов теплоотдачи от ТС к зерну лежат в границах 10.. 110 Вт/м²К. Наибольшие значения b достигаются при угловой координате $\gamma=45^\circ$, а наименьшие при $\gamma =180^\circ$. Средние значения коэффициента теплоотдачи растут с повышением скорости слоя $b =65$ Вт/м²К при $w= 2$ мм/с, и $b =105$ Вт/м²К при $w= 45$ мм/с. Влияние диаметра довольно специфично: сначала с возрастанием D наблюдается повышение b , а потом наблюдается снижение интенсивности теплоотдачи. Причем, максимум b с возрастанием w смещается в сторону больших значений D . Инженерная методика расчета зерносушилки основана на использовании обобщенных структур расчета слоевого подогревателя, калорифера, сушильной шахты, затрат воздуха и топлива в теплогенераторе и технико-экономических показателей. Сравнение результатов расчета по разработанной программе с данными испытаний термосифонного калорифера в производственных условиях и с литературными источниками по сушилке ДСП-320Т показало, что в первом случае погрешность не превышала 10%, а во втором 5%. Разработана поэтапная программа комплексной оптимизации блочной зерносушильной установки. Проведена её вариационная оптимизация и найденные конструктивные и режимные параметры обеспечивающие КПД установки 70% и расход дизельного топлива 4,8 кг/т. Важным

резервом повышения энергоэффективности является рециркуляция сушильного агента. Представлены компоновочные варианты, которые обеспечивают повышение КПД до 80%. Разработанная программа повышения энергоэффективности может быть использована для широкого внедрения на действующих зерносушилках, как при переводе их на комбинированный кондуктивно-конвективный способ сушки, так и при оптимизации систем теплоутилизации в частности схем рециркуляции отработанного сушильного агента.

ANNOTATION

Zykov A.V. Ecologically safe schemes and devices with thermosyphons for heat treatment of a grain. - Manuscript.

The thesis for scientific degree of Cand.Tech.Sci. by speciality 05.18.12 - processes and the equipment of food microbiological and pharmaceutical manufactures. - The Odessa national academy of food technologies, Odessa, 2003.

The dissertation is devoted to a problem of a theoretical and experimental substantiation of a direction of creation of ecologically safe and energy effective facilities for heat treatment (heating and drying) of grain, to creation of methods of optimization of a grain drying technical equipment. As a result of experimental and theoretical modeling the opportunities of application of thermosyphons for increase of grain drying technical equipment efficiency are proved. The new combined (convective-conductive) way of drying, which provides ecological safety, and power efficiency of drying is offered. The mathematical model of a block grain dryer is developed. The engineering design procedure and the program of its optimization are created. The variational optimization of a block grain drying installation is executed and its constructive and regime parameters, which provide the 70% of the installations efficiency, are found. The developed program of energy efficiency increasing can be used for wide introduction on working grain dryers.

Key words: thermosyphon, a grain dryer, mathematical modeling, heat exchange, optimization.