

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ОРЛЮК ЮРІЙ ТИМОФІЙОВИЧ

УДК 637.523.3 / 002 + 536.24

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИРНОГО ЗЕРНА ТА РОЗРОБКА  
НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ СИРОВИГОТОВЛЮВАЧА

05.18.12 - процеси та обладнання харчових, мікробіологіч-  
них та фармацевтичних виробництв

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2001

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Технологічному інституті молока та м'яса, м. Київ

**Науковий керівник** - доктор технічних наук, професор, академік Української академії аграрних наук **Єресько Георгій Олексійович**, Технологічний інститут молока та м'яса, директор

**Офіційні опоненти** - доктор технічних наук, професор **Орлов Леонід Олексійович**, Український державний університет харчових технологій, професор кафедри технологічного обладнання харчових виробництв

- кандидат технічних наук, доцент **Шинкарик Марія Миколаївна**, Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, доцент кафедри технологічного обладнання харчових виробництв

**Провідна установа** - НТК "Інститут технічної теплофізики" НАН України, м. Київ.

Захист дисертації відбудеться "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2001 року о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 Українського державного університету харчових технологій за адресою: 01033 м. Київ, вул. Володимирська, 68, ауд. \_\_\_\_\_

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці УДУХТ за адресою: 01033 м. Київ, вул. Володимирська, 68

Автореферат розісланий "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2001 року

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
к. т. н., доцент

В.Л.Зав'ялов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Теплова обробка сирного зерна - один з основних процесів при отриманні його для виробництва сирів. Теплова обробка у сировиготовлювачах характеризується процесом конвективного теплообміну в робочій суміші - молочному згустку, сирному зерні і сироватці. Практично ці процеси не достатньо досліджені. Важливими умовами реалізації процесу теплообміну є рівномірна передача теплоти від теплоносія до робочої суміші з певною швидкістю нагрівання.

Вивчення та дослідження теплообмінних процесів надає можливість розробити нову конструкцію сировиготовлювача, інтенсифікувати процес отримання сирного зерна, скоротити втрати теплоти та сировини при виробництві сиру.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Виконана робота безпосередньо пов'язана з виконанням: дослідної тематики НТЦ "Мінм'ясомолпрому" СРСР: тема № 738805 "Провести пошукові дослідження по розробці раціональної конструкції апарату для виробництва сирного зерна"; програми "УкрКОНВЕРСІЯ" Міністерства машинобудування, військово - промислового комплексу і конверсії України, розділ "Розробка обладнання для виробництва молочних продуктів" тема № 454/07 "Розробити комплекс обладнання для автоматизованого виробництва сиру"; комплексної програми Державного комітету з питань науки, техніки і промислової політики пріоритетних напрямків науково – технічного прогресу "Нові технології переробки сільськогосподарської продукції": тема № 03.08.01/023 "Розробити технологію та обладнання виробництва сирного продукту і сирів з різним вмістом жиру"; з виконанням цільової комплексної програми Української Академії аграрних наук 1991 – 1995 рр. "Продовольство – 95", розділ "Створення обладнання для виробництва молочних та м'ясних продуктів": теми № 10.7, 10.8, 10.34, 10.35, 10.44; з виконанням науково – технічної програми Української Академії аграрних наук 1996 – 2000 рр. "Переробка молока та м'яса (наукове забезпечення розвитку м'ясної та молочної промисловості)", розділ 01.000 "Розробити теоретичні основи створення сучасних технологій та оптимізації конструкцій обладнання для переробки м'ясної і молочної сировини", розділ 05.000 "Створити ефективне обладнання для переробки молока та вироблення молочних продуктів".

**Мета роботи** полягає у визначенні теплофізичних характеристик сирного зерна, дослідженні закономірностей конвективного теплообміну при його отриманні у вертикальних сировиготовлювачах, та розробці науково обґрунтованих методик розрахунку теплофізичних характеристик сировиготовлювача і створенні його нової конструкції з покращеними теплофізичними характеристиками.

**Задачі роботи,** виконання яких зумовило досягнення поставленої мети:

- розробити експериментальну установку для моделювання процесів конвективного теплообміну при отриманні сирного зерна;

- дослідити теплофізичні характеристики сирного зерна, сироватки та їхньої суміші (робочої суміші);
- дослідити вплив основних технологічних параметрів робочої суміші на її теплофізичні властивості;
- провести експериментальні дослідження реологічних характеристик робочої суміші;
- провести експериментальні дослідження конвективного теплообміну у вертикальних сировиготовлювачах;
- отримати критеріальну залежність, що описує конвективний теплообмін у сировиготовлювачі;
- провести експериментальну перевірку основних результатів досліджень у виробничих умовах;
- розробити та впровадити у виробництво апарати для отримання сирного зерна - сировиготовлювачі.

**Об'єкт досліджень.** Об'єктами досліджень обрані: сирне зерно, сирна сироватка, теплообмінні процеси, які протікають у вертикальних сировиготовлювачах.

**Наукові положення,** які виносяться на захист:

- методика проведення комплексних досліджень процесів конвективного теплообміну у сировиготовлювачах з урахуванням їх конструктивних особливостей та функціональної особливості робочої суміші;
- методика проведення комплексних досліджень ефективної в'язкості робочої суміші у сировиготовлювачах з урахуванням її функціональної особливості;
- емпіричне рівняння для розрахунку ефективної в'язкості робочої суміші сировиготовлювача;
- критеріальне рівняння, яке описує процес конвективного теплообміну у сировиготовлювачі;
- емпіричні рівняння для розрахунку теплофізичних характеристик (теплопровідності і теплоємності) сирного зерна, сироватки та робочої суміші.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що:

- вперше визначені кількісні та якісні закономірності залежності теплофізичних і реологічних характеристик робочої суміші при отриманні сирного зерна;
- досліджені закономірності зміни споживання теплової енергії в залежності від конструктивних особливостей робочих органів сировиготовлювача, режимів його роботи і структурно-механічних властивостей робочої суміші;
- підтверджені можливості підвищення ефективності роботи сировиготовлювача шляхом удосконалення його конструкції, конструкції робочих органів і підбору режимів обробки робочої суміші;
- визначені співвідношення геометричних параметрів робочих органів та режими обробки робочої суміші, які дозволяють зменшити втрати теплової енергії при отриманні сирного зерна.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що результати дисертаційної роботи дозволяють розробити апарати для отримання сирного зерна (сировиготовлювачі) нової конструкції з високими функціональними можливостями.

На основі отриманих результатів досліджень виконані розрахунки та розроблені нові конструкції вертикальних сировиготовлювачів. За конструкторською документацією, розробленою автором при допомозі співробітників Технологічного інституту молока і м'яса (ТІММ) виготовлені сировиготовлювачі: Я5-ОСЖ-1, Я5-ОСЖ-2,5, Я5-ОСЖ-3, Я5-ОСЖ-5, Я5-ОСЖ-10, Я5-ОСЖ-15, які пройшли виробничі випробовування і міжвідомчими комісіями рекомендовані до серійного виробництва. На всі зразки обладнання затверджені і зареєстровані в УкрЦСМ технічні умови.

Серійне виробництво сировиготовлювачів налагоджено в умовах Дослідного - механічного виробництва ТІММ, Хмельницького заводу "Темп", Черкаського заводу "Темп" та Нижньо - Туринського машинобудівного заводу (Росія).

З початку серійного виробництва для народного господарства виготовлено 242 сировиготовлювачі різної місткості.

**Особистий внесок здобувача** полягає у визначенні наукових задач, розробці методик досліджень, виконанні аналітичних та експериментальних досліджень, а також в практичній реалізації результатів роботи. Автору за наукову роботу "Створення високоефективного обладнання для виробництва сиру" присвоєно звання Лауреата премії Української академії аграрних наук "За видатні заслуги в аграрній науці" за 1995р.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи висвітлювалися та обговорювалися на:

- VII науково-технічній конференції "Проблеми і шляхи раціонального використання сировини в маслоробстві та сироробстві", Каунас, 1986;
- Республіканській науково-технічній конференції "Інтенсифікація технологій та модернізація обладнання переробних галузей АПК", Київ, 1989;
- Всеукраїнському науково-практичному семінарі "Нові технології і обладнання молочної промисловості", Рожище, 1996;
- Шостій міжнародній науково-технічній конференції "SYRO-TECH - 2000", Жиліна (Словаччина), 2000;
- Засіданнях Вченої Ради Технологічного інституту молока і м'яса УААН, Київ, щорічно із 1986 по 2000 рр.

Сировиготовлювачі демонструвалися на Міжнародних виставках і Всеукраїнських виставках – ярмарках, м. Київ, 1993-2000 рр.

**Публікації.** Зміст роботи викладено в 20 друківаних працях (три з яких у фахових наукових виданнях, одна – у матеріалах міжнародної конференції

“Сиротех – 2000, Словаччина), в тому числі в 6 авторських свідоцтвах, 3 патентах України, 1 патенті НДР.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається із вступу, шести розділів, висновків та 6 додатків. Основний зміст викладений на 131 сторінці машинописного тексту, вміщує: 49 рисунків обсягом 36 сторінок, 9 таблиць – 6 сторінок, 13 сторінок - список використаних літературних джерел із 131 найменування.

### Основний зміст роботи

**У вступі** розглянуто стан проблеми, обгрунтовано наукову та практичну актуальність теми дисертаційної роботи, мету роботи і завдання, які потрібно вирішити для її виконання, показано наукову новизну та практичну цінність.

**У першому розділі** проаналізовано загальні характеристики апаратів для виготовлення сирного зерна та теплообмінні процеси, що протікають при його отриманні. Розглянуто основні переваги та недоліки апаратів для отримання сирного зерна. Проаналізовано методи визначення теплофізичних характеристик харчових продуктів.

Враховуючи специфіку теплообмінних процесів, що протікають при виготовленні сирного зерна та функціональні особливості апаратів для його виготовлення, зроблено висновок про доцільність розробки нової конструкції вітчизняного сировиготовлювача з покращеними теплотехнічними характеристиками.

**У другому розділі** описано методи визначення фізико-хімічних та теплофізичних характеристик (**ТФХ**) робочої суміші. Обгрунтовано методи математичної обробки результатів експериментів.

**У третьому розділі** наведено результати досліджень теплофізичних характеристик робочої суміші сировиготовлювача.

В даній роботі застосовано комбінований метод визначення ТФХ, який надав можливість визначати ТФХ об'єкту дослідження протягом одного досліду та на одному приладі, а також, провести дослідження під час теплових і температурних навантажень, що мають місце у виробництві, тобто, імітувати реальні теплові процеси.

В процесі дослідження зразок об'єкту розміщували тонким плоским шаром, при цьому його приймали як необмежену пластину і розглядали одномірну просторову задачу, що описується диференціальним рівнянням.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C_{\rho}} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

Розв'язання рівняння (1) покладено в основу теоретичного обгрунтування теплотричного способу визначення ТФХ робочої суміші у вертикальних сировиготовлювачах нової конструкції.

Обробка результатів отриманих експериментальних даних виконувалось з використанням співвідношень:

$$\lambda = h \cdot \left[ \frac{2\Delta t}{(q_1 + q_2)} - R_3 \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$C_p = \frac{1}{h} \cdot \left( \frac{q_1 - q_2}{u} - T_3 \right), \quad (3)$$

Методична оцінка похибки визначення величин коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$ , та ізобарної теплоємності  $C_p$  не перевищувала  $\pm 5\%$ .

Робоча суміш досліджувалася з різним вмістом складових (сироватки, сирного зерна). Це дозволило дослідити робочу суміш сировиготовлювачів при виробництві сирів основного асортименту з масовою часткою жиру в сухій речовині від 30 % до 50 %.

Графічна обробка експериментальних даних дозволила отримати залежність величини коефіцієнту теплопровідності сироватки  $\lambda$  (рис. 1) та ізобарної теплоємності  $C_p$  (рис. 2) від температури  $t$  та масової частки сухої речовини  $\varphi$ . Апроксимація в логарифмічних координатах експериментальних даних, подальше узагальнення результатів експериментів та їх математичне опрацювання дозволили отримати емпіричну формулу (4) для розрахунків коефіцієнтів теплопровідності сироватки та формулу (5) для розрахунків теплоємності сироватки в діапазоні температур від  $10^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$ , та при вмісті сухої речовини від 5,0 % до 6,5 %.

$$\lambda = 0,53 \cdot t^{0,12} \cdot \varphi^{-0,14}, \quad (4)$$

$$C_p = 4535 \cdot t^{-0,001} \cdot \varphi^{-0,06}, \quad (5)$$

Графічна обробка експериментальних даних дозволила отримати залежність величини коефіцієнту теплопровідності сирного зерна  $\lambda$ , (рис. 3) і ізобарної теплоємності сирного зерна  $C_p$ , (рис. 4) від температури  $t$  та вмісту вологи  $\psi$ . Подальше узагальнення результатів експериментів та їх математичне опрацювання дозволили отримати емпіричне рівняння (6) для розрахунку коефіцієнта теплопровідності сирного зерна і емпіричне рівняння (7) для розрахунку теплоємності сирного зерна в діапазоні від  $10^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$  та від масової частки вологи в діапазоні від 55% до 68%:

$$\lambda = 0,0413 \cdot t^{0,156} \cdot \psi^{0,45}, \quad (6)$$

$$C_p = 1179,6 \cdot t^{0,062} \cdot \psi^{0,187}, \quad (7)$$

Робочим середовищем сировиготовлювачів є суміш, в якій під час технологічного процесу змінюється температура, відсотковий вміст компонентів. Тому для визначенні ТФХ робочої суміші сировиготовлювачів був застосований метод адитивності.

Рис. 1. Залежність величини коефіцієнта теплопровідності сироватки  $\lambda$  з масовою часткою сухої речовини 5,0 %...6,5 % від температури

Рис. 2. Залежність величини ізобарної теплоємності сироватки  $C_p$  з масовою часткою сухої речовини 5,0 %...6,5 % від температури

Рис. 3. Залежність величини коефіцієнта теплопровідності сирного зерна  $\lambda$  з вмістом води 55 %...68 % від температури

Рис. 4. Залежність величини ізобарної теплоємності сирного зерна  $C_p$  з вмістом води 55 %...68 % від температури

Опрацювання результатів експериментів та аналітичних даних дозволило отримати графічну залежність величини коефіцієнту теплопровідності робочої су-

міші сировиготовлювача  $\lambda_c$  (рис. 5) і ізобарної теплоємності  $C_{p_c}$  (рис. 6) від температури  $t$ , відсоткового вмісту сироватки  $\psi_c$  та основних технологічних параметрів процесу виготовлення сирного зерна. Графоаналітична обробка та узагальнення результатів експериментів (рис. 7, рис. 8) дозволили отримати емпіричні формули для розрахунку коефіцієнта теплопровідності та ізобарної теплоємності робочої суміші в процесі виготовлення сирного зерна. Ці формули справедливі для визначення ТФХ робочої суміші сировиготовлювачів в діапазонах температур від  $10^{\circ}\text{C}$  до  $60^{\circ}\text{C}$ .

$$\lambda_c = 0,152 \cdot t^{0,076} \cdot \psi_c^{0,236}, \quad (8)$$

$$C_{p_c} = 1514,78 \cdot t^{0,0078} \cdot \psi_c^{0,21}, \quad (9)$$

Розбіжність між величинами, розрахованими за формулами (8), (9) і величинами, що отримані експериментальним шляхом не перевищувала  $\pm 13,5\%$ , та  $\pm 13,8\%$ .

**В четвертому розділі** визначені реологічні властивості робочої суміші з урахуванням того, що в ній постійно відбувається зміна фізико-хімічних, структурно-механічних і теплофізичних характеристик. Під в'язкістю робочої суміші слід розуміти загальну реологічну характеристику, яка називається ефективною в'язкістю  $\mu_{\text{еф}}$ , і вимірюється за допомогою умовного параметра. Для її визначення використано метод вимірювання на універсальному приладі "Instron-1122" шляхом примусового занурення кулькового індентора з заданою швидкістю. Умовний показник в'язкості розраховували за формулою Стокса:

$$P = 6 \pi \cdot \mu \cdot v \cdot r, \quad (10)$$

де:  $P$  - лобовий опір, що реєструється приладом, Н;

$\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості, Пас;

$v$  - швидкість занурення кулькового індентора, м/с;

$r$  - радіус кулькового індентора, м.

Ця методика дозволяє визначати значення ефективною в'язкості робочої суміші не порушуючи її структури, що повністю імітує виробничі умови в процесі дослідження. Повторність дослідів - п'ятикратна. Графічна обробка результатів експериментів та узагальнення в логарифмічних координатах дозволили отримати графічну залежність величини ефективною в'язкості робочого середовища від температури  $t$  та відсоткового вмісту сироватки  $\psi_c$  в робочій суміші (рис. 9), а також отримати емпіричну формулу (11) для розрахунку ефективною в'язкості робочого середовища. Ця формула справедлива для визначення ефективною в'язкості робочої суміші  $\mu_{\text{еф}}$  сировиготовлювачів в діапазонах температур від  $10$  до  $60^{\circ}\text{C}$ :

$$\mu_{\text{еф}} = 0,147 \cdot t^{-0,72} \cdot \psi_c^{-0,57}, \quad (11)$$

Рис. 5. Залежність величини коефіцієнта теплопровідності робочої суміші  $\lambda_c$  з вмістом сироватки 87 % ... 78 % від температури

Рис. 6. Залежність величини ізобарної теплоємності робочої суміші  $C_p$  з вмістом сироватки 87...78 % від температури

Рис. 7. Узагальнення експериментальних даних по дослідженню величини коефіцієнта теплопровідності робочої суміші  $\lambda_c$  з вмістом сироватки 87 % ... 78 % від температури

Рис. 8. Узагальнення експериментальних даних по дослідженню величини ізобарної теплоємності робочої суміші  $C_p$  з вмістом сироватки 87 % ... 78 % від температури

Рис. 9. Залежність величини ефективної в'язкості робочої суміші  $\mu_{\text{ef}}$  для масової частки сироватки 78 % ... 87 % від температури

Розбіжність результатів по визначенню величини ефективної в'язкості робочої суміші, отриманих експериментальним шляхом та розрахованих за формулою (11), не перевищувала  $\pm 12,5\%$ .

**В п'ятому розділі** наведено результати експериментального дослідження теплообміну в процесі отримання сирного зерна за допомогою експериментального стенду. Модельним зразком в досліджах застосовувався апарат, зменшений по місткості, відносно до сировиготовлювача місткістю 5000 л, в 20 разів. При цьому виконувались умови геометричної подібності. Місткість модельного апарату дорівнювала 250 л. Розглядаючи теплообмін у сировиготовлювачі як теплообмін в апараті з механічними мішалками, слід припустити, що критеріальне відношення, яке описує процес тепловіддачі в даному випадку, в загальному виді запишеться:

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^m \cdot \text{Pr}^n \cdot \left( \frac{\mu_c}{\mu_{\text{ст}}} \right)^{0,14}, \quad (12)$$

Графоаналітичне опрацювання й узагальнення результатів експериментальних даних дозволили визначити складові рівняння (12) і отримати залежність, що описує процес теплообміну в сировиготовлювачі:

$$\text{Nu} = 1,16 \cdot \text{Re}^{0,68} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \left( \frac{\mu_c}{\mu_{\text{ст}}} \right)^{0,14}, \quad (13)$$

Отримана залежність адекватно описує процес теплообміну в межах коливання температури середовища, що нагрівається від 10 до 60 °С, частоті обертання різально-вимішувальних інструментів від 0,04 до 0,23 с<sup>-1</sup> і справедливе при наступних симплексах геометричної подібності:

$$\frac{H}{D} = 0,55 \qquad \frac{h}{H} = 0,96 \qquad \frac{d}{D} = 0,95 \quad , \qquad (14)$$

де: H - висота стовпа робочої суміші, м; D - еквівалентний діаметр робочої ємності сировиготовлювача, м; h - висота теплообмінної сорочки, м; d - еквівалентний діаметр різально-вимішувального інструменту сировиготовлювача, м.

**В шостому розділі** наведено результати практичної реалізації виконаної роботи: для ефективної реалізації процесу отримання сирного зерна були розроблені нові сировиготовлювачі (рис. 10). Отримані експериментальні дані при введенні в експлуатацію розроблених сировиготовлювачів свідчать про їх високу технологічну ефективність. Основні характеристики сировиготовлювачів наведені в табл. 1, 2.

Розбіжність при співставленні експериментальних результатів та визначених за формулою (13) не перевищувала ± 12,5% .

Інструмент різально-  
вимішувальний

Робоча ємність

Теплообмінна  
сорочка

Рис.10. Сировиготовлювач марки Я5-ОСЖ

Таблиця 1

## Технічні характеристики сировиготовлювачів

Назва параметрів	Одиниця вимірювання	Фактичні значення			
		Я5-ОСЖ-1	Я5-ОСЖ-5	Я5-ОСЖ-10	Я5-ОСЖ-15
Робоча ємність	л	1000	5000	10000	15000
Потужність електропривода	кВт	0,75	2,2	3,0	4,0
Маса	кг	450	3200	4600	5750
Витрати теплоти	кДж/год	29465	152259	223048	356872
Зайнята площа	м <sup>2</sup>	2	11	17	20

Таблиця 2

## Експериментальні дані по дослідженню витрат теплоти у сировиготовлювачах

Номер Виробки	Витрати тепла у сировиготовлювачах, кДж/год.					
	Я5-ОСЖ-1	Я5-ОСЖ-5	Я5-ОСЖ-10	Я5-ОСЖ- 15	“Елгеп”	“Альфа-Лаваль”
1	29776,8	156932,1	221314,5	355444,5	162274,1	262872,5
2	27082,7	144237,7	215926,1	363527,8	167051,7	268260,4
3	29865,5	155242,1	216325,5	347361,4	173248,9	273648,3
4	31676,2	149973,5	231361,2	353948,1	166992,6	271361,9
5	29372,6	148534,9	222612,8	365049,4	169662,5	269360,2
6	30376,1	157232,3	213918,2	359839,6	165662,7	260298,5
7	28576,8	155961,5	237305,6	359944,7	171388,3	270210,7
8	28996,8	149958,9	225618,9	349859,2	172962,8	272340,1
Середні значення	29465,4	152259,1	223047,9	356871,8	168655,5	268544,1

**ВИСНОВКИ**

1. Проведені експериментальні дослідження теплофізичних характеристик сирного зерна та сироватки і визначені їх числові значення. Отримані емпіричні залежності для розрахунку теплофізичних характеристик сирного зерна і сирної сироватки, які справедливі в діапазоні температур від 10 до 60 °С.

Значення величин коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  для сироватки знаходяться в діапазоні від 0,535 до 0,645 Вт/(м·К), значення величин ізобарної теплоємності  $C_p$  - в діапазоні від 4060 до 4125 Дж/(кг·К).

Значення величин коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  для сирного зерна знаходяться в діапазоні від 0,369 до 0,535 Вт/(м·К), значення величин ізобарної теплоємності  $C_p$  - в діапазоні від 2875 до 3540 Дж/(кг·К).

2. Досліджено вплив основних технологічних параметрів робочої суміші сировиготовлювача на її теплофізичні властивості. Отримані емпіричні залежності, які описують взаємозв'язок між теплофізичними властивостями та основними технологічними параметрами, які справедливі в діапазоні температур від 10 до 60 °С.

Значення величин коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  робочого середовища знаходяться в діапазоні від 0,505 до 0,602 Вт/(м·К), значення величин ізобарної теплоємності  $C_p$  - в діапазоні від 3840 до 4000 Дж/(кг·К).

3. Проведені експериментальні дослідження реологічних характеристик робочої суміші на універсальному вимірювальному приладі "Instron-1122". Встановлений вплив основних технологічних параметрів робочої суміші на її реологічні властивості. Отримана емпірична залежність, яка описує взаємозв'язок між ефективною в'язкістю  $\mu_{\text{еф}}$  та основними технологічними параметрами робочої суміші. Ця в'язкість досліджувалась в діапазоні температур від 10 до 60 °С. Значення її величин знаходяться в діапазоні від 0,051 до 0,249 Па·с.

4. Проведені експериментальні дослідження процесу теплообміну у вертикальних сировиготовлювачах і визначено вплив технологічних режимів виробництва сирного зерна на процес теплообміну і встановлено, що максимальне значення величини коефіцієнта тепловіддачі сировиготлювача  $\alpha$  знаходиться в діапазоні частоти обертання різально-вимішувального інструмента від 0,15 до 0,23 с<sup>-1</sup>.

5. Отримана критеріальна залежність, яка описує процес теплообміну у вертикальних сировиготовлювачах в процесі виробництва сирного зерна, яка адекватно описує процес теплообміну у сировиготовлювачі в межах нагрівання робочої суміші від 10 до 60 °С.

Проведена оптимізація теплообміну в сировиготовлювачах при симплексах геометричної подібності ( $H/D = 0,55$ ;  $h/H = 0,66$ ;  $d/D = 0,95$ ).

6. Розроблені нові конструкції сировиготовлювача з покращеними теплотехнічними характеристиками. Виготовлено та впроваджено у виробництво: сировиготовлювач Я5-ОСЖ-1 місткістю 1000 л (виготовляється серійно), комплекс сироробний Я5-ОКС продуктивністю 300 кг сиру за зміну (виготовляється серійно), сировиготовлювач Я5-ОС2Ж-1 місткістю 1000 л (виготовляється серійно), сировиготовлювач Я5-ОСЖ-2,5 місткістю 2500 л (робоча конструкторська документація передана заводу виготовлювачу), сировиготовлювач Я5-ОСЖ-3 місткістю 3000 л (виготовлено 2 дослідні зразки), сировиготовлювач Я5-ОСЖ-5 місткістю 5000 л (виготовляється серійно), сировиготовлювач Я5-ОСЖ-10 місткістю 10000 л (виготовляється серійно), сировиготовлювач Я5-ОСЖ-15 місткістю 15000 л (виготовляється серійно).

7. Новизна роботи підтверджена авторськими свідоцтвами на винаходи № 1159524, 1389016, 1611286, 1670827, 1830652, 1839297, патентами України № 4721, 4726, 9916 і патентом Німеччини № 265512.

Крім того, нова конструкція сировиготовлювача з покращеними теплотехнічними характеристиками дозволяє в процесі отримання сирного зерна знизити теплові витрати (близько 10 %), збільшити вихід готової продукції (на 3...5 %) та створити умови для виробництва готової продукції гарантованої якості.

**Перелік робіт опублікованих за змістом дисертації:**

1. Орлюк Ю.Т. Сыроизготовитель Я5-ОСЖ-5/ Ю.Т.Орлюк, А.А.Савченко// М'ясо та молоко. – Вип. 2. - УААН - ТИММ. - К. - 1997. - С. 6-8.
2. Орлюк Ю.Т. Комплекс сыродельный для цехов мощностью до 300 кг сыра в смену/ Ю.Т.Орлюк, А.А.Савченко// М'ясо та молоко. - Выпуск 3. - УААН - ТИММ. - К.: - 1997. - С. 3-6.
3. Орлюк Ю.Т. Сыроизготовитель марки Я5-ОСЖ-5/ Ю.Т.Орлюк, А.А.Савченко// Информационный листок № 098-97. - Киев ЦНТЭИ. - К. - 1997. С. 1-4.
4. Ересько Г.А. Новые модели вертикальных сыроизготовителей/ Г.А.Ересько, Ю.Т. Орлюк, А.А.Савченко// Молочная пром. — 1997. — № 8. — С. 16-18.
5. Орлюк Ю.Т. Выработка сырного зерна при производстве сыров из овечьего молока/ Ю.Т.Орлюк, А.А.Савченко// Вівчарство. - 1998. - Вип. 30. - С. 145.
6. Орлюк Ю.Т. Разработка технологии и оборудования для производства сыров из овечьего молока/ Ю.Т.Орлюк, А.А.Савченко // Вівчарство. - 1998. - Вип. 30. - С. 146 - 147.
7. Орлюк Ю.Т. Сыроизготовитель марка Я5-ОС2Ж-1/ Ю.Т.Орлюк, А.А.Савченко// М'ясо та молоко. - Выпуск 4. - УААН - ТИММ. - К. - 1998. - С. 6-9.
8. Jeresko G.A. Nove technologie a technologicke zariadenia na vyrobu syrov/ G.A. Jeresko, Y.T. Orlyuk, A.A. Savcenko// Zbornik prednasok - SYROTECH 2000 “Syrarstvo v tret'om tisicroci” — 6 medzi-narodna konferencia o technike a technologii vyroby syrov — SR, Zilina. — 2000. — S. 162 — 167.
9. Орлюк Ю.Т. Дослідження теплообміну у сировиготовлювачах вертикального типу/ Ю.Т.Орлюк, О.А.Савченко// Вісник аграрної науки.- 2000.- №10.- С.65 – 66.
10. Єресько Г.О. Вертикальний сировиготовлювач нового покоління/ Г.О.Єресько, Ю.Т. Орлюк, О.А.Савченко// Харч. і переробна пром. - 2001.- № 4.- С.26-27.
11. А.с. № 1159524 СССР, МКИ А 01 j 25\02. Сыроизготовитель / Ересько Г.А., Генинг В.Г., Орлюк Ю.Т., Шалабанов С.И. - №3685325; Заявл. 03.01.84; Опубли. 07.08.85. – Бюл. №21 – с. 18.
12. А.с. № 1389016 СССР, МКИ А 01 j 25\12. Установка для производства сыра / Генинг В.Г., Кимачинский С.И., Орлюк Ю.Т. - №4113231; Заявл. 01.09.86; Опубли. 15.12.87. - ДСП.
13. А.с. № 1611286 СССР, МКИ А 01 j 25\02. Сыроизготовитель / Генинг В.Г., Орлюк Ю.Т., Кимачинский С.И., Савченко А.А. - №4645054; Заявл. 02.02.89; Опубли. 07.12.90. – Бюл. №45 – с. 21.

14. А.с. № 1670827 СССР, МКИ А 01 j 25\02. Аппарат для выработки сырного зерна / Генинг В.Г., Орлюк Ю.Т., Кимачинский С.И., Савченко А.А. - №4776755; Заявл. 02.01.90; Опублик. 15.04.91. – ДСП.
15. А.с. № 1830652 СССР, МКИ А 01 j 25\02. Аппарат для выработки сырного зерна / Ересько Г.А., Генинг В.Г., Орлюк Ю.Т., Кимачинский С.И., Савченко А.А. - №4653581; Заявл. 02.03.89; Опублик. 13.10.92. – ДСП.
16. А.с. № 1839297 СССР, МКИ А 01 j 25\02. Аппарат для выработки сырного зерна / Генинг В.Г., Орлюк Ю.Т., Кимачинский С.И., Савченко А.А.- №4755527; Заявл. 08.08.89; Опублик. 30.04.93. – ДСП.
17. Пат. № 4721 Україна, МКІ А 01 j 25\02. Сыроизготовитель / Генинг В.Г., Кимачинський С.І., Орлюк Ю.Т., Савченко О.А., Черняк С.І.- №94240441; Заявл. 15.06.93; Опублик. 28.12.94. – Бюл. №7-1- с.19.
18. Пат. № 4726 Україна, МКІ А 01 j 25\01. Апарат для вироблення сирного зерна / Генинг В.Г., Орлюк Ю.Т., Кимачинський С.І., Савченко О.А.- №94240443; Заявл. 25.06.93; Опублик. 28.12.94. – Бюл. №7-1 – с.17.
19. Пат. № 9916 Україна, МКІ А 01 j 25\02. Сыроизготовитель /Ересько Г.О., Генинг В.Г., Орлюк Ю.Т., Кимачинський С.І., Савченко О.А., - №94240441; Заявл. 15.06.93; Опублик. 28.12.94. – Бюл. №7-1 – с.22.
20. Пат. № 265512 ГДР, МКІ<sup>4</sup> А 01 j 25\00. Установка для производства сыра / Ересько Г.А., Генинг В.Г., Орлюк Ю.Т., Волнянский В.И., Кузнецов А.С. - №3755610/28-13; Заявл. 27.07.84; Опублик. 15.06.88. – ГДР Берлин ул. Моренстр, 37-б.

## АНОТАЦІЯ

Орлюк Ю.Т. Теплофізичні характеристикти сирного зерна і розробка нової конструкції сировиготовлювача. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв, Український державний університет харчових технологій. Київ, 2001.

Дисертація присвячена проблемі визначення теплофізичних характеристик сирного зерна, підвищенню ефективності процесу теплообміну при його отриманні у вертикальних сировиготовлювачах в процесі виробництва сичужних сирів. З метою отримання об'єктивних даних, необхідних для розробки нової конструкції сировиготовлювача розроблена методика комплексних досліджень з визначення теплофізичних характеристик робочої суміші сировиготовлювача ( суміш сироватки і сирного зерна), її реологічних властивостей. Також, досліджено вплив конструктивних характеристик сировиготовлювача на процес теплообміну. Встановлено геометричні симплекси подібності між конструктивними елементами сировиготовлювачів. Для описання процесу теплообміну, що забезпечує отри-

манья сирного зерна високого гатунку, отримано емпіричне рівняння в критеріальній формі. В результаті використання встановлених геометричних симплексів подібності та отриманого емпіричного рівняння розроблені нові конструкції сировиготовлювачів місткістю від 1000 до 15000 л, які дозволили підвищити вихід готового продукту, покращити його якість.

Ключові слова: сир, сирне зерно, сировиготовлювач, теплообмін, теплофізична характеристика, в'язкість, робоча суміш.

## АННОТАЦІЯ

Орлюк Ю.Т. Теплофизические характеристики сырного зерна и разработка новой конструкции сыроизготовителя. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств, Украинский государственный университет пищевых технологий. Киев, 2001.

Диссертация посвящена проблеме определения теплофизических характеристик сырного зерна, повышения эффективности процесса теплообмена при его получении в вертикальных сыроизготовителях.

До настоящего времени процессы конвективного теплообмена, которые протекают при получении сырного зерна в вертикальных сыроизготовителях не рассматривались с технико-физической точки зрения. Не проводились теплофизические и реологические исследования рабочей смеси сыроизготовителя (смесь сыворотки и сырного зерна) в условиях адекватных промышленным. Не изучалось влияние конструктивных особенностей формы рабочей ёмкости сыроизготовителя и его рабочих органов на характер протекания теплообменных процессов. Также, не проводились исследования по уточнению коэффициентов критериального уравнения, описывающего процесс теплообмена в сыроизготовителе с учётом его конструктивных особенностей.

С целью получения объективных данных, необходимых для разработки новой конструкции сыроизготовителя с оптимальными теплотехническими характеристиками разработана методика проведения комплексных исследований по определению теплофизических характеристик рабочей смеси сыроизготовителя, её реологических свойств и взаимосвязи между конструктивными особенностями сыроизготовителя, его рабочих органов и процессами конвективного теплообмена, протекающими при получении сырного зерна.

Теплофизические характеристики рабочей смеси исследовались при помощи тепломассомера конструкции Украинского государственного университета пищевых технологий. Следует отметить, что сырное зерно – это белково-жировая система сквашенного молокосвёртывающим препаратом молока, сферообразной

формы, размером 3...10 мм. Сыворотка – это жидкий компонент, который образуется в процессе синерезиса сквашенного молока свёртывающим препаратом молока. Учитывая то, что рабочей смесью сыроизготовителя является суспензия с постоянно изменяющимся процентным содержанием компонентов при определении её теплофизических характеристик применялся метод адетивности и определялись теплофизические характеристики сыворотки и сырного зерна. Эти исследования позволили получить критериальные уравнения для определения коэффициента теплопроводности и изобарной теплоёмкости рабочей смеси сыроизготовителя в диапазоне температур 10... 60 °С.

Определение реологических свойств рабочей смеси проводились с учётом того, что при производстве сычужных сыров постоянно происходит изменение её физико-химических, структурно-механических и теплофизических свойств. Следовательно, под вязкостью рабочей смеси необходимо понимать общую реологическую характеристику с названием эффективная вязкость  $\mu_{\text{эф}}$ . Измерения проводились на универсальном измерительном приборе “Instron-1122” путём принудительного погружения шарикового индентора в рабочую смесь при непрерывном её перемешивании и подогреве. В результате исследований было получено эмпирическое уравнение для определения эффективной вязкости рабочей смеси в диапазоне температур 10... 60 °С:

Для исследования процесса конвективного теплообмена была создана, адекватная промышленным образцам сыроизготовителя экспериментальная установка вместимостью 250 л. При проведении комплексных исследований предложена методика определения теплотехнических характеристик сыроизготовителя. Проводились исследования влияния конструктивных особенностей сыроизготовителя на процесс теплообмена при получении сырного зерна. В результате исследований получено критериальное уравнение для адекватного описания процесса конвективного теплообмена, протекающего в сыроизготовителе при получении сырного зерна:

$$\text{Nu} = 1,16 \cdot \text{Re}^{0,68} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \left( \frac{\mu_c}{\mu_{\text{ст}}} \right)^{0,14} \quad (15)$$

где:  $\mu_c$  - эффективная вязкость рабочей смеси при температуре получения сырного зерна, Па·с,  $\mu_{\text{ст}}$  – эффективная вязкость рабочей смеси при температуре греющей стенки, Па·с.

Сыроизготовитель не является цилиндрической ёмкостью, а представляет сложную конструкцию, состоящую из трёх пересекающихся и совмещённых на плоскости цилиндров, поэтому, были введены понятия эквивалентных диаметров сыроизготовителя и режуще-вымешивающего инструмента.

В процессе исследований были определены геометрические симплексы подобия между конструктивными элементами сыроизготовителя, при которых уравнение (15) адекватно описывает процесс конвективного теплообмена:

$$\frac{H}{D} = 0,55 ; \quad \frac{h}{H} = 0,96 ; \quad \frac{d}{D} = 0,95 ;$$

где:  $H$  - высота столба рабочей смеси, м;  $D$  - эквивалентный диаметр ёмкости сыроизготовителя, м;  $h$  - высота теплообменной рубашки, м;  $d$  - эквивалентный диаметр режуще-вымешивающего инструмента сыроизготовителя, м.

На основании геометрических симплексов подобия и эмпирического уравнения (15) разработаны новые конструкции сыроизготовителей вместимостью от 1000 до 15000л, которые позволяют уменьшить потребление тепловой энергии в процессе производства сычужных сыров (до 10%), снизить количество сырной пыли при получении сырного зерна и повысить выход готового продукта гарантированного качества.

Ключевые слова: сыр, сырное зерно, сыроизготовитель, теплообмен, теплофизическая характеристика, вязкость, рабочая смесь.

## ANNOTATION

Orliuk Yu.T. Thermophysical Characteristics of Cheese Grain Curd Obtaining and Developing of New Cheesemaking Machine's Design. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Sciences Degree (Technics), specialization 05.18.12 – Processes and Apparatus for Food, Microbiological and Pharmaceutical Production, Ukrainian State University of Food Technologies, Kiev, 2001.

This thesis is devoted to the problem of defining the thermophysical characteristics of cheese grain curd, raising the efficiency of heat exchange processes when obtaining it in vertical type cheesemaking machines while producing the rennet cheese. To receive the objective data necessary for developing new cheesemaking machine's design, the methods of integrated researches for defining the thermophysical characteristics of working mixture in a cheesemaking machine (the mixture of whey and cheese grain curd), together with its rheological properties, has been made. The influence of cheesemaking machine's design upon the heat exchange process has also been studied. The geometrical simplexes of similarity of cheesemaking machine's constructive elements have been ascertained. The equation in criteria form has been made to describe the heat exchange process which ensures the obtaining of high quality cheese grain curd. The use of geometrical simplexes ascertained and empiric equation made has enabled to develop the new design of cheesemaking machines their volume from 1000 to 15000 l, making it possible to raise the final product's output and to improve its quality.

Key words: cheese, cheese grain curd, cheesemaking machine, heat exchange, thermophysical characteristic, density, working mixture.