

В.О. Потапов, д-р техн. наук (ХДУХТ, Харків)

О.В. Петренко, асист. (ХДУХТ, Харків)

Е.В. Білецький, канд. техн. наук (ХТЕІ КНТЕУ, Харків)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК УНІВЕРСАЛЬНОГО ЖАРИЛЬНОГО АПАРАТА З ПРОМІЖНИМ ОБІГРІВОМ

Запропоновано методика визначення теплообмінних характеристик універсального жарильного апарата з непрямим обігрівом кремнійорганічним теплоносієм, яка дозволяє адекватно оцінити процеси тепловіддачі від нагрівальних елементів до проміжного теплоносія, від проміжного теплоносія до робочої поверхні, від робочої поверхні до харчового жиру.

Предложена методика определения теплообменных характеристик универсального жарочного аппарата с косвенным обогревом кремнийорганическим теплоносителем, которая позволяет адекватно оценить процессы теплоотдачи от нагревательных элементов к промежуточному теплоносителю, от промежуточного теплоносителя к рабочей поверхности, от рабочей поверхности к пищевому жиру.

The method of determination of heat-transfer characteristics of universal fryer apparatus with the indirect heating by silicon organic heat-carrier is offered, which allows adequately to estimate the processes of heat transfer from heaters to intermediate heat-carrier, from intermediate heat-carrier to the working surface, from a working surface to food fat.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Процеси жарення широко розповсюджені на підприємствах харчової індустрії. Одним зі способів жарення, який широко застосовують на підприємствах харчової індустрії будь-якої потужності, є жарення на відкритій поверхні в невеликій кількості жиру (5...10% від маси продукту) [1].

Основною перевагою жарення цим способом є високі теплотехнічні показники, тому що тепло від жарильної поверхні передається безпосередньо обжарюваному продукту. До недоліків можна віднести нерівномірність підсмаженої шкоринки, що можна пояснити двома причинами. По-перше, більшість харчових продуктів мають складну геометричну форму, їхня поверхня не є гладкою, у такому випадку контакт з жарильною поверхнею є неідеальним, що призводить до місцевих перегрівів. По-друге, апаратам для проведення процесу жарення основним способом притаманна велика нерівномірність температурно-

го поля робочої поверхні, завдяки недосконалій конструкції нагрівальних елементів – ТЕНів, що також призводить до місцевих перегрівів харчових продуктів та псування харчових жирів під час проведення процесу жарення [1; 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним зі шляхів усунення вищезгаданих недоліків є переведення жарильного обладнання на непрямий обігрів проміжним високотемпературним теплоносієм [2].

У 60-80 роках минулого сторіччя на підприємствах харчування застосовувалися теплові апарати з проміжним обігрівом, у результаті багаторічної практики під час експлуатації вищеназваного обладнання було досягнуто високий технологічний ефект. Так, наприклад, сковороди СКЕ-0,3 та СКГ-0,3 забезпечували оптимальну рівномірність температурного поля на жарильній поверхні, що сприяло зниженню питомих витрат жирів, електроенергії та підвищенню якості готової продукції [3]. Але серійне виробництво сковорід СКЕ-0,3 та СКГ-0,3 було припинено, експлуатацію на підприємствах харчування заборонено, тому що мінеральне мастило Вапор-Т, яке використовувалося як проміжний теплоносій, виявилось непридатним у зв'язку з його термічною нестабільністю та високою інерційністю. На підприємствах харчування були зареєстровані вибухи сковорід, що декілька разів призвело до летальних випадків обслуговуючого персоналу.

У роботі [4] започатковано розв'язання даної проблеми: запропоновано конструкцію універсального жарильного пристрою з непрямим обігрівом кремнійорганічним теплоносієм.

Теплообмінні процеси, які відбуваються в теплових апаратах з проміжним обігрівом мають деякі відмінності від теплообмінних процесів в апаратах з безпосереднім обігрівом. Це пов'язано в першу чергу з наявністю так званої «мастильної оболонки», яка заповнена проміжним теплоносієм, в об'ємі якого розташовано нагрівальні пристрої. Наявність цієї оболонки й дає змогу отримати «м'який обігрів», що сприяє підвищенню ефективності та економічності цього обладнання. Тому важливим науково-практичним завданням є дослідження процесів теплообміну, які мають місце в нагрівальних оболонках цих апаратів, а також тепловіддачі від робочої поверхні до харчового жиру, в якому відбувається процес жарення кулінарних виробів.

Мета та завдання статті. Мета та завдання даної статті полягає у розробці методики та експериментального стенда для визначення теплотехнічних характеристик універсального жарильного апарата з непрямим обігрівом робочої поверхні проміжним кремнійорганічним теплоносієм.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для визначення теплообмінних процесів універсального жарильного пристрою з непрямим обігрівом кремнійорганічним теплоносієм нами було розроблено та виготовлено експериментальний стенд, який дозволив дослідити та адекватно оцінити процеси тепловіддачі від нагрівальних елементів до проміжного теплоносія, від проміжного теплоносія до робочої поверхні, від робочої поверхні до харчового жиру. Схему експериментального стенда для дослідження теплотехнічних характеристик універсального жарильного пристрою з непрямим обігрівом кремнійорганічним теплоносієм наведено на рисунку.

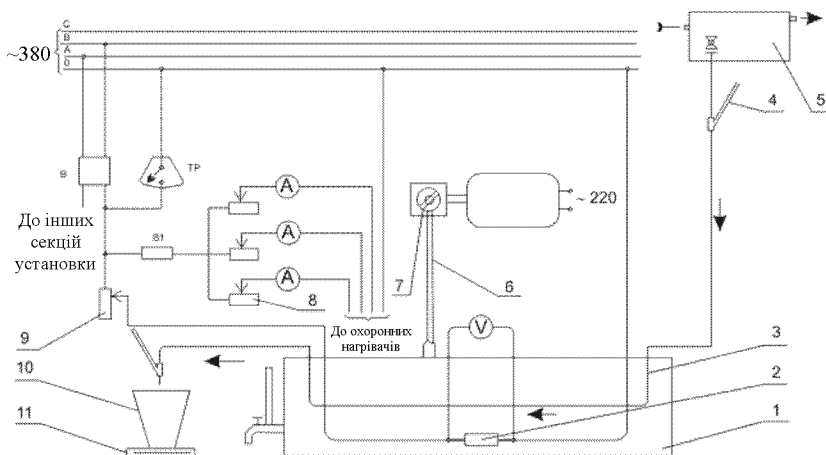


Рисунок – Схema експериментального стенда для дослідження теплотехнічних характеристик універсального жарильного пристрою з непрямим обігрівом кремнійорганічним теплоносієм: 1 – модель жарильного пристрою; 2 – нагрівач; 3 – калориметр; 4 – термометр; 5 – напірний бак; 6 – термопари; 7 – перемикаюча панель пристрою Ф-266; 8 – регулятори напруги РНШ-10; 9 – варіатор напруги типу РНО – 220/250; 10 – електронні ваги ВР4149; 11 – посуд-збирач гарячої води.

Модель апарата являє собою двостінну жарильну ванну. Простір між внутрішніми та зовнішніми стінками ванни є мастильною оболонкою, в яку крізь отвір заливається кремнійорганічний теплоносіє. Для контролю рівня теплоносія передбачена мірна трубка з краном. В об'ємі теплоносія розташовано трубчастий електронагрівач. Зовнішні стінки моделі покриті шаром теплової ізоляції; з двох бокових сторін та зі сторони дна розташовані електричні спіралі, які використовують-

ся як охоронні нагрівачі, що дає змогу створювати тепловий потік, рівний за величиною втратам теплоти в оточуюче середовище.

Температура на поверхні ТЕНів, в об'ємі проміжного теплоносія, на робочій поверхні та в об'ємі харчового жиру визначалася за допомогою хромель-копелевих термопар (ТХК), які крізь перемикаючу панель приєднувалися до приладу Ф-266.

Теплозйом у ході досліджень організовувався за допомогою трубчастого або плоского калориметра, який було занурено в харчовий жир. З напірного бака вода подавалася до калориметра, протікала крізь нього, нагрівалася в ході проведення експерименту та збиралася в посуд-збирач, який потім зважувався на електронних вагах ВР4149. Температура води на вході та виході з калориметрів вимірювалася ртутними термометрами зі шкалою від 0 до 150⁰ и ціною поділки 1⁰ С. Напряга та сила струму, спожиті ТЕНами та охоронними нагрівачами, визначалися за показниками вольтметрів та амперметрів. Для регулювання енергії, яка подавалася в ланцюг ТЕНів, було встановлено варіатор напруги типу РНО – 220/250, у ланцюги нагрівачів – регулятори напруги РНШ-10. Експериментальні дослідження з визначення характеру зміни температури на поверхні ТЕНа, в об'ємі проміжного теплоносія та на робочій поверхні проводилися на експериментальному стенді, наведеному на рисунку 1.

Під час проведення досліджень визначення теплообмінних характеристик жарильного апарата з проміжним обігрівом послідовність проведення експерименту була такою. Після перевірки всіх вузлів установка підготовлювалася до роботи у вибраному режимі, вмикалися електронагрівач та охоронні нагрівачі, відкривалися крани для запускання води в калориметр. Після виходу на стаціонарний режим нагріву проводилося знімання показників термопар, при цьому фіксувалася сила струму та напруги в мережі ТЕНа, витрата води та її температура на вході та виході з калориметра, тривалість експерименту. До початку замірів за показниками контрольних термопар установлювався такий режим роботи охоронних нагрівачів, при якому витрати тепла в оточуюче середовище дорівнювались потужності охоронних нагрівачів.

Для обчислення витрат тепла скористаємося рівнянням теплового балансу процесу:

$$U \cdot J = q_1 + q_2, \quad (1)$$

де q_1 – кількість теплоти, яка витрачається на підігрів води в калориметрі; q_2 – кількість теплоти, яка витрачається в оточуюче середовище.

Потужність охоронних нагрівачів обиралася таким чином, щоб компенсувати втрати теплоти в оточуюче середовище:

$$U_1 \cdot J_1 = q_2, \quad (2)$$

де U_1, J_1 – напруга та сила струму охоронних нагрівачів.

Теплове навантаження від ТЕНів до калориметра за цих умов дорівнює:

$$U \cdot J = q_0 + (q_2 - U_1 \cdot J_1) = q_0, \quad (3)$$

де $q_0 = G \cdot (I_2(t_{\text{вих. води}}) - I_1(t_{\text{вх. води}}))$; $I_2(t_{\text{вих. води}}), I_1(t_{\text{вх. води}})$ – ентальпія води за температур на виході та вході калориметра; G – витрата води, кг/с.

Після проведення експериментальних досліджень визначалися коефіцієнти тепловіддачі. Методи визначення коефіцієнтів тепловіддачі різноманітні, але в кожному окремому випадку вибір методу обумовлюється задачею та конкретними вимогами дослідження. Особливості задачі, яка розглядається, передбачають використання методу стаціонарного режиму для визначення коефіцієнта тепловіддачі, в основі якого покладено закон Ньютона – Ріхмана, який описується таким рівнянням

$$dQ = \alpha \cdot \Delta t \cdot dF, \quad (4)$$

де Q – теплове навантаження; α – коефіцієнт тепловіддачі; Δt – температурний напір рідина – стінка; F – площа теплопередавальної поверхні.

Під час вимірювання коефіцієнта тепловіддачі основне завдання – це створення постійно направленою теплового потоку q та перепаду температур Δt , саме цього вдалося досягти на розробленому нами експериментальному стенді.

Спираючись на матеріал, який викладено в роботах [2; 3], де розглядається процес тепловіддачі при вільній конвекції в обмеженому просторі за різноманітного розташування поверхні нагріву та охолодження, можна зробити припущення, що рівняння теплообміну для випадку, який має місце в жарильному апараті, буде мати такий критеріальний вигляд:

$$Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot H^k, \quad (5)$$

де A , n та k – сталі величини; H – симплекс, який визначає співвідношення геометричних величин, які впливають на процес тепловіддачі.

Нами розглядається випадок, коли тепловий апарат складається з жарильної ванни, робочої поверхні, яка омивається проміжним кремнійорганічним теплоносієм. У середині нагрівальної оболонки в об'ємі теплоносія знаходяться трубчасті електронагрівачі (ТЕНи). Під час роботи апарата тепловий потік передається від ТЕНів крізь проміжний теплоносій до робочої поверхні. У цьому випадку коефіцієнт тепловіддачі від нагрівальних елементів (ТЕНів) до проміжного теплоносія можна визначити за такою формулою:

$$\alpha_{n-m} = \frac{q_0}{(t_n - t_m) \cdot F_n} = \frac{U \cdot J}{(t_n - t_m) \cdot F_n}. \quad (6)$$

де q_0 – теплове навантаження, Вт; U – напруга електричної мережі, яка живить ТЕН, В; J – сила струму, А; t_n – середня температура на поверхні нагрівача, $^{\circ}\text{C}$; t_m – середня температура в об'ємі теплоносія, $^{\circ}\text{C}$; F_n – площа теплопередавальної поверхні ТЕНів.

Коефіцієнт тепловіддачі від проміжного теплоносія до робочої поверхні можна визначити за формулою:

$$\alpha_{m-p.n} = \frac{U \cdot J}{(t_m - t_{p.n}) \cdot F_{p.n}}. \quad (7)$$

де t_m – середня температура в об'ємі теплоносія, $^{\circ}\text{C}$; $t_{p.n}$ – середня температура на робочій поверхні, $^{\circ}\text{C}$; $F_{p.n}$ – площа робочої поверхні.

Коефіцієнт тепловіддачі від робочої поверхні до жиру можна визначити за формулою:

$$\alpha_{p.n-жс} = \frac{U \cdot J}{(t_{p.n} - t_{жс}) \cdot F_{p.n}}. \quad (8)$$

де $t_{жс}$ – середня температура в об'ємі жиру, $^{\circ}\text{C}$.

За визначальну температуру прийнято відповідно середню температуру в об'ємі теплоносія та в об'ємі харчового жиру. Такий вибір

досить добре враховує вплив температури направленного потоку, а також є найпростішим для практичних розрахунків.

За даними роботи [5], процес теплообміну від горизонтально розташованого циліндра до рідини залежить від діаметра циліндра та його розташування в об'ємі рідини. Спираючись на ці дані, можна зробити припущення, що для випадку тепловіддачі від нагрівача до проміжного теплоносія геометричний симплекс являє собою співвідношення

$$H_{n-m} = \frac{h_n}{d_n}, \quad (9)$$

де h_n – відстань від центру нагрівача до робочої поверхні; d_n – діаметр нагрівача.

Для випадку тепловіддачі від проміжного теплоносія до робочої поверхні геометричний симплекс може бути виражено співвідношенням

$$H_{m-n} = \frac{h_n}{b_o}, \quad (10)$$

де $2b_o$ – відстань між осями нагрівача.

Для опису процесу тепловіддачі від робочої поверхні до харчового жиру геометричний симплекс має таке співвідношення:

$$H_{n-жс} = \frac{b_{жс}}{\delta_{жс}}, \quad (11)$$

де $b_{жс}$ – ширина робочої ванни; $\delta_{жс}$ – висота шару жиру в робочій ванні.

Під час проведення досліджень з визначення теплообмінних характеристик апаратів з кремнійорганічним проміжним теплоносієм в якості раціонального плану проведення експерименту приймався план із «розщепленими ділянками», в якому під ділянкою розумілася серія експериментів на одній моделі, а під розщепленням ділянки – рандомізація (свідоме внесення випадковості в проведення експерименту з метою усереднення впливу неконтрольованих чинників), дослідів усередині однієї серії, шляхом варіювання питомого теплового навантаження та температури робочого середовища.

Окремо проводилася серія дослідів за планом однофакторного експерименту, в якому під час варіювання навантаження змінювалися умови теплозйому таким чином, що температура харчового жиру підтримувалася сталою ($t_{ж} = 180^{\circ} \text{C}$).

Висновки. Розроблено експериментальний стенд для вивчення теплотехнічних характеристик універсального жарильного апарата з непрямим обігрівом кремнійорганічним теплоносієм. Запропоновано експериментальну методику визначення коефіцієнтів тепловіддачі та критеріальні рівняння, які описують процеси теплоперенесення від ТЕНів до проміжного теплоносія.

Список літератури

1. Черевко, О. І. Процеси та апарати жаріння харчових продуктів [Текст] : навч. посібник / О. І. Черевко, В. М. Михайлов, І. В. Бабкіна / Харк. держ. академія технолог. та орг. харчування. – Харків : ДЮД ХДАТОХ, 2000. – 332 с.

2. Беляев, М. И. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов [Текст] : монография / М. И. Беляев, П. Л. Пахомов. – Харьков : ХИОП ; Комунист, 1991. – 160 с.

3. Беляев, М. И. Тепловые процессы и качество продукции в общественном питании [Текст] : монография / М. И. Беляев. – М. : Экономика, 1979. – 136 с.

4. Сафонов, В. В. Застосування кремнійорганічного теплоносія в системі обігріву електричної сковороди з проміжним теплоносієм [Текст] / В. В. Сафонов, О. В. Петренко, Е. В. Білецький // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. пр. / Харківський держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2007. – Вип. 1 (5). – С. 341–346.

5. Кулиниченко, В. Р. Справочник по теплообменным расчетам [Текст] / В. Р. Кулиниченко. – К. : Техника, 1990. – 165 с.

Отримано 15.03.2009. ХДУХТ, Харків.

© В.О. Потапов, О.В. Петренко, Е.В. Білецький, 2009.