

УДК 536.24:664.684

DOI: 10.15587/2313-8416.2015.56317

ВПЛИВ БОРОШНА «ЗДОРОВ'Я» ТА ПОРОШКУ КЕРОБУ НА ТЕПЛОМАСООБМІННІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ПІД ЧАС ВИПІКАННЯ БІСКВІТНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

© О. Л. Романовська, Н. П. Форостяна, С. В. Баглюк, М. В. Лазаренко

Під час створення фізико-математичної моделі теплового процесу необхідно враховувати фронт проникнення теплового поля в бісквіт у процесі випікання (критерій Біо), величину підйомної сили (критерій Грасгофа), залежність коефіцієнта теплопровідності від температури. Важливою складовою дослідження є визначення оптимальної температури та ефективного режиму випікання бісквітного напівфабрикату в залежності від наявних інгредієнтів

Ключові слова: *температурне поле, випікання, коефіцієнт теплопровідності, критерій Біо, критерій Грасгофа, градієнт температури*

During building a physical and mathematical model of the thermal process it should take into account the penetration front of the thermal field in the biscuits during baking (Biot criterion), the lift force (Grashof criterion), the dependence of the thermal conductivity coefficient on temperature. An important component of the research is to determine the optimum temperature and effective regime of semi-finished biscuit baking, depending on available ingredients

Keywords: *temperature field, baking, thermal conductivity coefficient, Biot criterion, Grashof criterion, temperature gradient*

1. Вступ

В Україні активно проводяться дослідження, пов'язані з випіканням харчових продуктів та їх охолодженням. Випікання – це процес проникнення теплового поля в харчовий продукт. Важливим є дослідження характеру впливу теплового поля на водомісткі харчові продукти з врахуванням швидкості руху фронту поля. Нагрівання бісквітного тіста призводить до збільшення тиску в пухирцях і до зміни структури бісквіту. Рух пухирців у бісквітному тісті забезпечує підняття тіста і створення пружної структури. Характер руху фронту теплової хвилі у кожному зразку є різним, бо кожен зразок має різну рецептуру, компоненти якої по різному реагують на проникаюче теплове поле. Основними теплофізичними характеристиками, якими характеризується саме теплове поле є коефіцієнт теплопередачі, теплоємність. Опис характеру поведінки теплового поля поблизу об'єкту дослідження описується критеріальними рівняннями з використанням теорії подібності. Проникнення теплового поля в об'єкт описується критерієм Біо, Фуре, Грасгофа. Проаналізувавши весь процес випікання бісквіту з позицій теплового поля даються рекомендації, щодо самого технологічного процесу випікання. Коректування теплового поля є суттєвим при створенні продуктів за новою рецептурою.

2. Літературний огляд та постановка проблеми

Визначенням теплофізичних характеристик (ТФХ) харчових продуктів в Україні займаються не так багато вчених. Головною проблемою таких досліджень є складність розв'язку диференціальних рівнянь, якими описується теплове поле і сам тепловий процес. Аналіз наукових досліджень показав, що над проблемою з дослідження впливу теплового поля на харчові продукти активно займаються закордонні

вчені Білорусії та Росії. Особливо великого значення набули роботи із вдосконалення методів щодо вивчення впливу нестационарних теплових полів на харчові продукти. Значних успіхів у розробці методів з вивчення впливу теплового поля під час випікання досягли А. С. Гінсбург [1], О. Т. Лисовенко [2]. Широкого використання набув метод, розроблений О. В. Ликовим [3] з визначення теплових коефіцієнтів та розв'язку диференціального рівняння теплопровідності в процесі нагрівання тіла тепловим полем, що описується лінійною функцією часу. Велика робота із систематизації методів визначення ТФХ харчових продуктів була проведена Л. Ф. Чудновським, Г. М. Дульневим, О. Г. Шишковим, Г. І. Красовською, В. Л. Шевельковим, К. Л. Шептуновим, М. В. Кулаковим [4].

Особлива увага під час випікання приділяється визначенню оптимальних параметрів термообробки, вивченню кінетики проникнення тепла. Дана проблематика частково висвітлена у наукових роботах М. В. Белікова, О. А. Герашенко, В. В. Дорохович, О. Т. Лисовенко, І. І. Маклюкова, В. І. Телечкуна, Ф. Г. Шумаєва.

3. Мета статті

Метою нашого дослідження є комплексне дослідження ТФХ бісквіту під час його випікання з використанням універсального вимірювального комп'ютерного приладу (УВКП); створення фізико-математичної моделі теплового процесу; надання рекомендації щодо вибору оптимального теплового поля для випікання бісквіту з урахуванням складу харчової сировини (інгредієнтів).

4. Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження є бісквітне тісто, приготуване за рецептурою [5] в наступних концентраціях: зразок № 1 – контроль «Бісквіт основний», зра-

зрок № 2 – з заміною БПВГ (борошно пшеничне вищого гатунку) на 30 % борошна «Здоров'я» (бісквіт «Чернівецький»), зразок № 3 – контроль «Бісквіт з какао» (контроль «Прага»), зразок № 4 – з заміною БПВГ на 30 % борошна «Здоров'я» та 100 % -ою заміною какао на порошок керобу (бісквіт «Зоряний»). Дослідження проведені з використанням універсального вимірювального комп'ютерного приладу за методом розігрітого циліндра [6].

У даній роботі експериментальним шляхом визначено коефіцієнт теплопровідності, використавши УВКП, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 1.

Принцип роботи УВКП ґрунтується на перетворенні сигналів датчиків вимірювання фізичних величин на цифрові дані та їх подальшій обробці.

Для вивчення поведінки бісквіту з подальшим розрахунком його теплофізичних характеристик використовуємо обладнання, яке зображене на рис. 2.



Рис. 1. Зовнішній вигляд УВКП

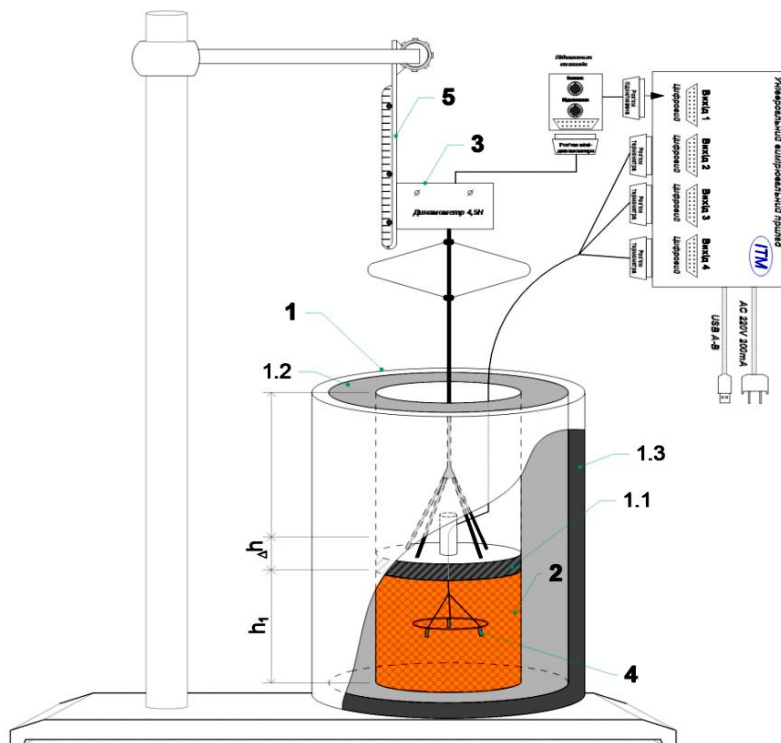


Рис. 2. Система для комплексного дослідження харчових продуктів: 1 – калориметр (1.1 – поршень; 1.2 – внутрішній циліндр калориметра; 1.3 – зовнішній циліндр калориметра); 2 – робоча камера; 3 – динамометр; 4 – термопари; 5 – мікрометр

Під час випікання бісквітного напівфабрикату система, зображена на рис. 2, дозволяє зафіксувати динаміку росту тіста (за рахунок переміщення досліджень за допомогою динамометра 3, а система термопар 4 фіксує зміну температури тіста під час випікання. Таким чином, використана система дозволяє одночасно провести комплексне дослідження теплофізичних і деформаційних властивостей об'єкту дослідження, що допоможе створити єдину модель поведінки бісквітного тіста під час випікання в стаціонарному тепловому полі.

5. Результати досліджень ТФХ бісквіту під час його випікання

За О. В. Ликовим [7] існує два напрямки дослідження теплофізичних властивостей вологих капілярно-пористих тіл і дисперсних середовищ, до яких належать і харчові продукти. Перший напрямок дослідження є традиційним – експериментальне визначення теплофізичних характеристик харчових продуктів. Другий метод – теоретичний, він полягає у аналітичному вивченні процесу тепло- і масопереносу із створенням фізико-математичної моделі процесу.

Об'єкти дослідження відносяться до вологовмістких харчових продуктів. При поміщенні таких об'єктів у стаціонарне теплове поле в напрямку до їх центру сферично розповсюджується фронт теплової хвилі. Характер теплового фронту оцінюємо через критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda},$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до виробу, $\frac{Bm}{m^2 \cdot K}$; ℓ – визначальний розмір, м; λ – коефіцієнт теплопровідності тіла, що нагрівається, $\frac{Bm}{m \cdot K}$. Результати розрахунку критерію наведено в табл. 1.

Як видно із табл. 1, перший фронт теплового поля слабо проникає в зразок № 1, крім того цей зразок має сильну відмінність середнього значення критерію Біо і кінцевого. Причиною цього є наявність значного відсотку крохмалю у складі бісквіту. По іншому «поводить» себе зразок № 2, коли відбулася заміна борошна вищого гатунку на борошно «Здоров'я». Борошно, в основі якого є пророщене зерно у розчині морської харчової солі, характеризується зменшенням кількості клейковини і збільшенням пористості тіста. Це призводить до збільшення критерію Біо, який вказує на збільшення швидкості проникнення теплового поля в зразок. Числове значення критерію Біо для зра-

зку № 2 становить 0,035, що у 4.4 рази більше, ніж для контрольного зразку. Отже, заміна борошна вищого гатунку на 30 % борошна «Здоров'я» дозволяє покращити режим теплової обробки бісквітного напівфабрикату і пришвидшити його випікання, а отже скоротити час випікання. Щодо зразку № 3, то він у рецептурі не містив крохмалю, а мав порошок какао. Проникнення поля за таких умов збільшилося у 1.3 рази у порівнянні зі зразком № 1. Проте заміна борошна вищого гатунку на 30 % борошна «Здоров'я» та заміна какао на порошок керобу покращує проникнення теплового поля у 6.1 рази. Отже, при заміні борошна вищого гатунку на 30 % борошна «Здоров'я» необхідно особливу увагу звернути на тепловий режим випікання бісквітних напівфабрикатів. Якщо взяти до уваги лише критерій Біо, то першим висновком є рекомендація щодо температури випікання бісквітів. За експериментальними даними для зразків № 1 та № 2 випікання слід розпочинати від моменту нагрівання шафи, тобто поміщати тісто в шафу, коли її температура становить 60 °С. Нагриваючись бісквіт «піднімається», а при температурі 180 °С він буде повністю пропеченим. Щодо зразків № 3 та № 4, то для них повністю підходить стаціонарне поле температурою 180 °С.

Таблиця 1

Значення критерія Біо для досліджуваних зразків

зразок	Критерій Біо (серед.)	Критерій Біо (в кінці випікання)
№1	0,008	0,004
№2	0,035	0,028
№3	0,011	0,0091
№4	0,067	0,068

Щойно наведені висновки підтверджуються і графічними залежностями зміни температури в середині зразків від часу, отримані завдяки УВКП. Наприклад, для зразку № 1 і № 3, що є контрольними, ми маємо наступні графіки (рис. 3, 4).

Тангенс кута для зразку № 1 становить 0,37, а для зразку № 3 – 0,9, що підтверджує збільшення у 3 рази інтенсивності проникнення теплового поля саме в зразку № 3. Якщо ж порівняти зразок № 2 та № 4, то отримуємо наступні графіки (рис. 5, 6).

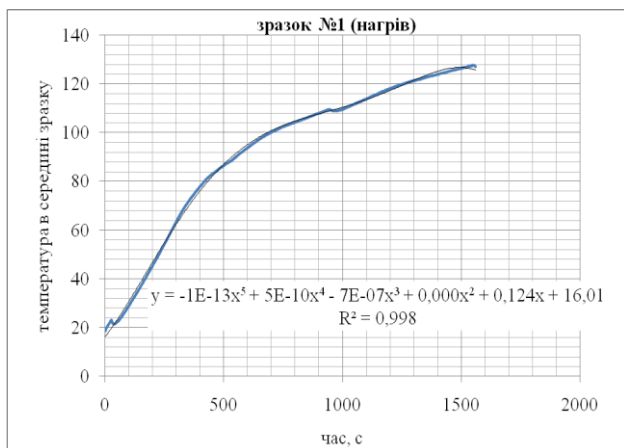


Рис. 3. Графік зміни температури в середині зразку № 1 від під час випікання

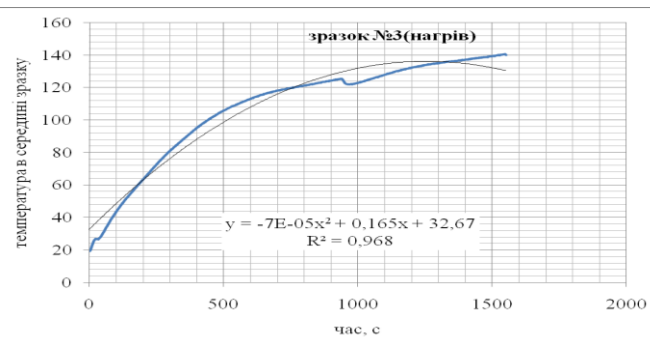


Рис. 4. Графік зміни температури в середині зразку № 3 від під час випікання

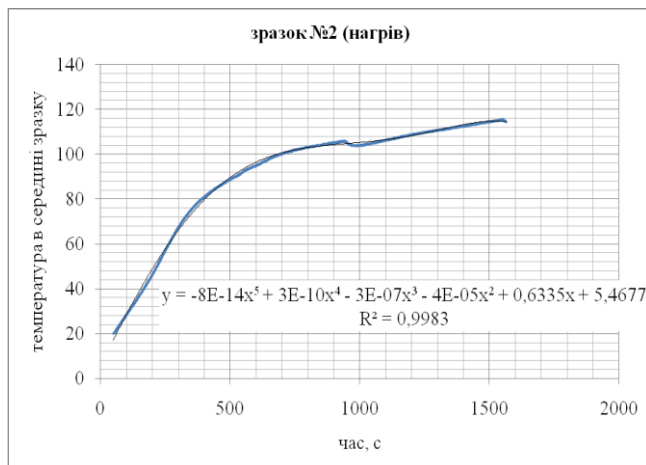


Рис. 5. Графік зміни температури в середині зразку № 2 від під час випікання

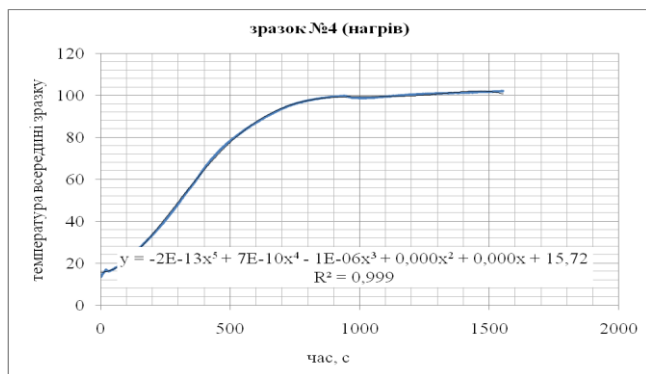


Рис. 6. Графік зміни температури в середині зразку № 4 від під час випікання

Тангенс кута для зразку № 2 становить 0,85, що у порівнянні із контрольним збільшився у 2.7 разів, тобто швидкість проникнення теплового поля збільшилася. А от зразок № 4 має тангенс кута рівним 0,61 і у порівнянні із контрольним, зменшився у 1.5 рази, що призвело до однорідності проникнення теплового поля в зразок. Загалом за численними експериментальними дослідженнями критерій Біо не повинен змінюватися у широких межах під час випікання і мати постійне значення і за такої умови температурне поле прогріватиме об'єкт рівномірно. За нашими експериментальними даними вибраний нами температурний режим максимально підходить лише зразку № 4 і це підтверджується експериментально. На кожному рисунку подано залежність зміни темпе-

ратури в середині зразку від часу, яка необхідна нам для визначення градієнту температури. Сам градієнт температури вказує напрямок і швидкість зростання температури у зразку. Об'єднавши результати зміни градієнту температури у зразку та врахувавши проникнення фронту теплового поля ми маємо цілісну картину поведінки теплового поля в речовині зразку.

Температурний режим випікання бісквітного тіста впливає і на кінетику піднімання тіста під час випікання. Найменшу висоту мали бісквіти зразків № 1 та № 2. Найкращий вигляд мав зразок № 4. Щоб пояснити такий результат, ми скористаємось критерієм Грасгофа, саме він дозволяє визначити підйомну силу тіста під час випікання. Так як наші об'єкти є достатньо вологомісткими, то піднімання тіста відбувається за рахунок вологи, а точніше її випаровування. Збільшення тиску вологи в результаті нагрівання змушує розширюватися об'єкт і піднімає тісто (табл. 2)

Таблиця 2

Значення критерія Грасгофа для досліджуваних зразків

зразок	25 °C	50 °C	75 °C	100 °C
№ 1	$6,70 \cdot 10^6$	$3,82 \cdot 10^6$	$2,19 \cdot 10^6$	$1,21 \cdot 10^6$
№ 2	$2,61 \cdot 10^6$	$0,49 \cdot 10^6$	$0,16 \cdot 10^6$	$0,06 \cdot 10^6$
№ 3	$6,70 \cdot 10^6$	$3,86 \cdot 10^6$	$2,19 \cdot 10^6$	$1,21 \cdot 10^6$
№ 4	$6,71 \cdot 10^6$	$3,87 \cdot 10^6$	$2,19 \cdot 10^6$	$1,21 \cdot 10^6$

За отриманими результатами, наведеними в таблиці 2, слідує, що у зразках № 1, № 3, та № 4 достатньо вологи для створення відповідного тиску, який і забезпечує підняття бісквітного тіста під час випікання. Щодо зразку № 2, то йому не вистачає вологи, а отже при поєднанні крохмалю і борошна «Здоров'я» у рецептурі необхідно збільшити відсоток вологи за рахунок попереднього зволоження самого борошна «Здоров'я».

Зміна компонентів у рецептурі тіста змінює загалом і коефіцієнт теплопровідності. Коефіцієнт теплопровідності у теорії теплообміну взаємопов'язаний із градієнтом температури в законі Фур'є:

$$q = -\lambda \text{grad}T.$$

Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури представлено графічно (рис. 7).

Коефіцієнти теплопровідності для готових бісквітів відповідно становлять: для зразку

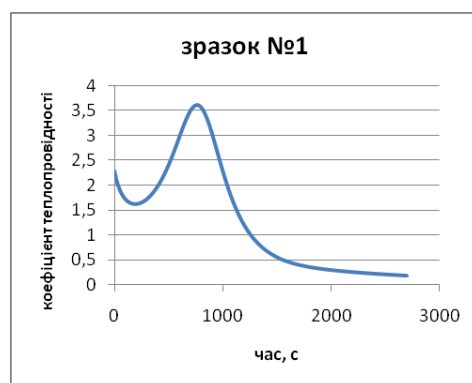
$$\text{№ 1} - 0,49 \frac{Вт}{м \cdot К},$$

$$\text{№ 2} - 0,48 \frac{Вт}{м \cdot К},$$

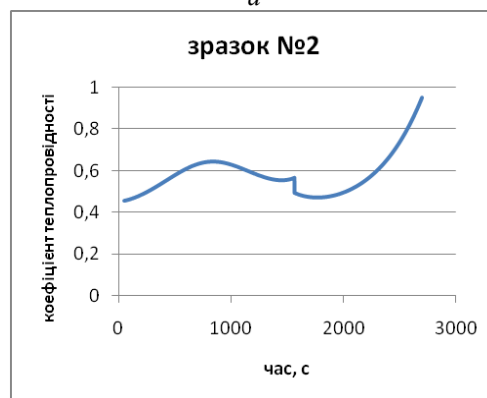
$$\text{№ 3} - 0,64 \frac{Вт}{м \cdot К},$$

$$\text{№ 4} - 0,47 \frac{Вт}{м \cdot К}.$$

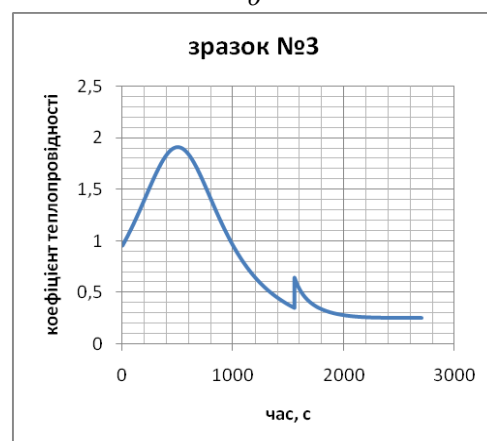
Для контрольних зразків графіки мають піки, що говорить про зростання швидкості проникнення теплового поля в зразок, вони ніби отримують «термоудар» на 500-ій секунді випікання.



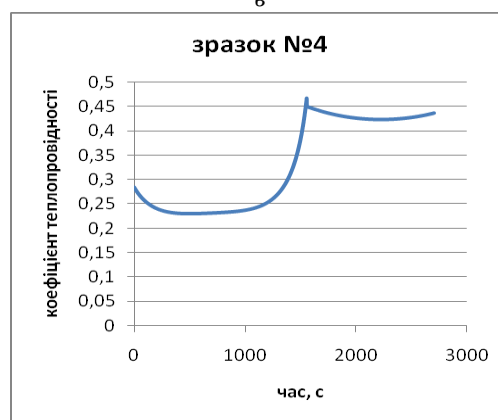
а



б



в



г

Рис. 7. Залежність коефіцієнту теплопровідності від часу для процесу випікання бісквітного тіста (до 1500 с): а – зразок № 1 (контроль «Бісквіт основний»); б – зразок № 2 (бісквіт «Чернівецький»); в – зразок № 3 (контроль «Прага»); г – зразок № 4 (бісквіт «Зоряний»)

Для зразку № 2 пік набагато згладжений. Це говорить про те, що наявне пророщене зерно набирає на себе теплову енергію, тобто поступово прогривається. Такий стан проникнення теплового поля покращує загусання крохмалю і перешкоджає підняттю тіста. Зразок № 4 не має піку, спостерігається утворення «западини», викликаної наявністю пророщеного зерна та відсутністю крохмалю. Весь процес випікання відбувається практично за сталого значення коефіцієнта теплопровідності, що у свою чергу дозволяє отримати і підняття тіста, і рівномірний розподіл теплового поля в зразку.

6. Висновки

Отже, в результаті досліджень було отримано розподіл теплового поля в бісквітному напівфабрикаті під час його випікання у стаціонарному тепловому полі. Отримані значення коефіцієнта теплопровідності зразків лежать в межах $0,45 \pm 0,06 \left(\frac{Bm}{m \cdot K} \right)$. Розра-

ховані критерії Біо та Грасгофа дають цілісну картину розподілу теплового поля в середині зразків. Проведене нами комплексне дослідження бісквітів дозволяє стверджувати, що бісквіти із вмістом крохмалю та 30 % борошна «Здоров'я» слід випікати в нестационарному тепловому полі в діапазоні від 60 до 180 °С, на відміну від бісквітів, які не містять крохмалю. Бісквіти, у яких до рецепту входить какао, потребують для приготування стаціонарне теплове поле з температурою 180 °С. Наявність крохмалю та 30 % борошна «Здоров'я» зменшує силу підйому, збільшує густину, зменшує пористість структури. Термін зберігання зменшується. У комбонуванні рецептури з порошком кербу та 30 % борошна «Здоров'я» ситуація вигідно відрізняється.

Отже заміна харчової сировини веде до значних змін у теплофізичних характеристиках харчових продуктів, розрахунок яких є необхідною умовою для технологічного процесу випікання.

Література

1. Константинов, С. М. Технічна термодинаміка [Текст] / С. М. Константинов. – К.: Політехніка, 2001. – 368 с.
2. Лысовенко, А. Т. Процесс выпечки и тепловое regime в современных хлебопекарских печах [Текст] / А. Т. Лысовенко. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 214 с.

3. Гинсбург, А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов [Текст]: справочник / А. С. Гинсбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. – изд. 2-е, доп. и пер. – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 288 с.

4. Юсупов, Ш. Т. Теплофизические и термодинамические свойства растительных масел и некоторых их растворов в широком интервале температур и давлений [Текст]: автореф. дис. ... док. техн. наук / Ш. Т. Юсупов. – Душанбе, 2012. – 298 с. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/teplofizicheskie-i-termodynamicheskie-svoistva-rastitnykh-masel-i-nekotorykh-ikh-rastvorov#ixzz3TKT0kgeK>

5. Павлов, А. В. Сборник рецептов мучных, кондитерских и булочных изделий [Текст] / А. В. Павлов. – СПб: Гидрометеоздат, 1998. – 294 с.

6. Шаповал, С. Л. Виконання науково-дослідних робіт з використанням універсального вимірювального комп'ютерного приладу [Текст] / С. Л. Шаповал, Н. П. Форостяна, Ю. В. Литвинов, Р. П. Романенко. – К.: КНТЕУ, 2013. – 86 с.

7. Теория тепломассообмена [Текст] / под ред. А. И. Леонтьева. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. – 683 с.

8. Обертюх, Р. Р. Теоретичні основи теплотехніки [Текст]: навч. пос. / Р. Р. Обертюх. – Вінниця, 2009. – 169 с.

References

1. Konstantinov, S. M. (2001). *Tekhnichna termodynamika*. Kyiv: Politekhnik, 368.
2. Lysovenko, A. T. (1976). *Protsess vypechky u teplove rezhymy v sovremennykh khlebopekarskykh pechakh*. Moscow: Pyschevaia promyshlennost', 214.
3. Hynsburh, A. S., Hromov, M. A., Krasovskaia, N. Y. (1980). *Teplofyzicheskye kharakterystyky pyschevykh produktov*. Moscow: Pyschevaia promyshlennost', 288.
4. Jusupov, Sh. T. (2012). *Teplofizicheskie i termodynamicheskie svoystva rastitel'nykh masel i nekotorykh ih rastvorov v shirokom intervale temperatur i davlenij*. Dushanbe, 298. Available at: <http://www.dissercat.com/content/teplofizicheskie-i-termodynamicheskie-svoistva-rastitnykh-masel-i-nekotorykh-ikh-rastvorov#ixzz3TKT0kgeK>
5. Pavlov, A. V. (1998). *Sbornik retseptur muchnykh, kondyterskykh y bulochnykh yzdelij*. Sankt-Peterburg: Hydrometeozdat, 1998. – 294 s.
6. Shapoval, S. L., Forostiana, N. P., Lytvynov, Yu. V., Romanenko, R. P. (2013). *Vykonannia naukovo-doslidnykh robіt z vykorystanniam universal'noho vymiriuval'noho komp'uternoho prykladu*. Kyiv: KNTEU, 86.
7. Leont'ev, A. Y. (Ed.) (1997). *Teoriya teplomassoobmena*. Moscow: MHTU ym. N. E. Bauman, 683.
8. Obertiukh, R. R. (2009). *Teoretychni osnovy teplotekhniky*. Vinnitsa, 169.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Ковбаса В. М.
Дата надходження рукопису 12.11.2015*

Романовська Ольга Леонідівна, здобувач, кафедра технології і організації ресторанного господарства, Київський національний торговельно-економічний університет, вул. Кіото, 19, м. Київ, Україна, 02156
E-mail: romaolga-1@mail.ru

Форостяна Нінель Петрівна, доцент, кандидат педагогічних наук, кафедра інженерно-технічних дисциплін, Київський національний торговельно-економічний університет, вул. Кіото, 19, м. Київ, Україна, 02156
E-mail: forostyann@gmail.com

Баглюк Сергій Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра фізики, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601
E-mail: bagliuk_sv@ukr.net

Лазаренко Михайло Васильович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедри фізики, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601