



UDC: 664.6/7

**SUBSTANTIATION OF THE DESIGN OF BAKING OVENS WITH  
RECIRCULATION OF COMBUSTION PRODUCTS****ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ХЛІБОПЕКАРСЬКИХ ПЕЧЕЙ З  
РЕЦИРКУЛЯЦІЮ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ****Fedoriv V.M. / Федорів В.М.***s.t.s., as. prof. / к.т.н., доц.*

ORCID: 0000-0002-4499-0910

**Liukhovets V.V. / Люховець В.В.***s.t.s. / к.т.н.*

ORCID: 0000-0002-6978-7820

**Mankov V.I. / Маньков В.І.***student***Stepanets O.V. / Степанець О.В.***student**Khmelnytskyi National University,**11 Instytutaska St., Khmelnytskyi, 29016**Хмельницький національний університет,**вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016*

**Abstract.** *The article deals with the problems of the influence of rational operating modes of baking ovens, which is an important task of the oven operation for significant fuel savings. In bakery ovens, one of the main quantities most sensitive to load changes is the temperature of the gases that go into the environment.*

*The purpose of the article is to evaluate the process of establishing the dependence of the exhaust gas temperature on the oven performance and to determine the most rational performance for this type of oven.*

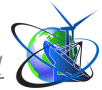
*To achieve this goal, the following tasks were performed: to establish the regularities of external heat and mass transfer during the heating of baked dough pieces; to establish the regularities of internal heat and mass transfer in the phase transition zone of baked dough pieces and bakery products; a comprehensive study of the influence of the radiation-convection baking regime on the quality indicators of bakery products and technological costs caused by heat and mass transfer in baking ovens; a methodology for thermal calculation of baking ovens for practical use in creating energy-saving baking techniques was specified.*

**Key words:** *dough piece, bakery products, bakery oven, rational mode, fuel, temperature, heat, productivity.*

**Introduction.**

Bakery products are produced at agricultural raw material recycling facilities, where raw materials are collected during the technological process to create multi-component food products.

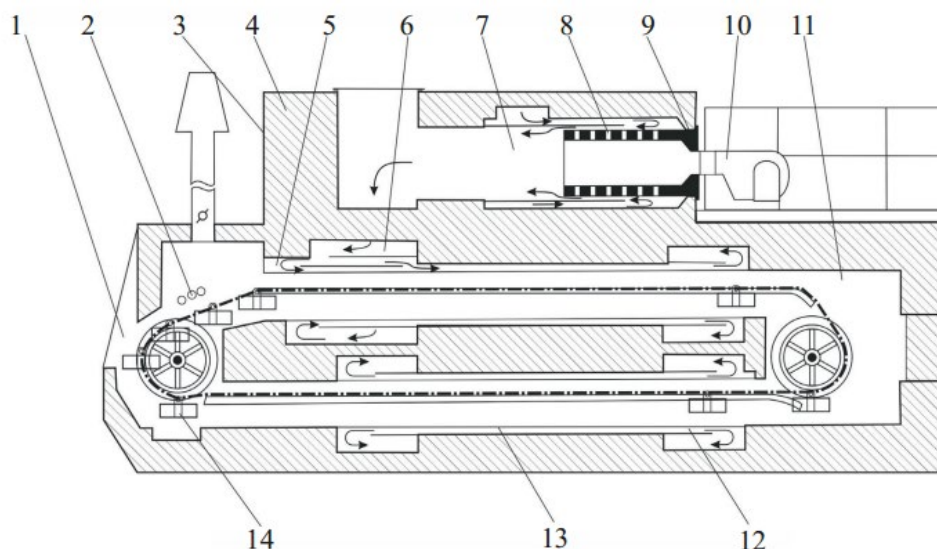
A bakery oven is one of the main units that determines the technical level of bakery production. The oven must ensure good product quality, a high degree of mechanization, the lowest specific fuel consumption, and low thermal inertia. During the baking process in the baking chamber, heat is transferred to the dough pieces by radiation from the heating surfaces, convection from the vapor-gas environment of the baking chamber, and thermal conductivity from the bottom of the oven to the bottom surface of the dough piece [1-4].



**Research methodology.** A baking oven can operate with different productivity  $G$ , while the value of specific fuel consumption  $b=f(G)$  will vary. The rational operation of the oven is achieved when the specific fuel consumption reaches the minimum value. Determining the rational performance in terms of heat savings is an important task. In industrial furnaces, one of the main values most sensitive to changes in performance is the temperature of the exhaust gases  $t_{ex}$ , which leave the furnace and enter the environment. This, in turn, is associated with a significant heat loss with exhaust gases  $q_g$ . The latter value determines the change in fuel consumption, which is not directly related to the furnace performance. Therefore, the task of determining the rational performance of the furnace is mainly reduced to establishing an exact or approximate dependence of the value of the exhaust gas temperature on the performance [5-9].

**Research results.** During the development of the new energy-saving ovens, special attention was paid to solving the problems that largely affect the efficiency of baking ovens. This is, first of all, a reduction in heat energy consumption due to: reducing heat emissions into the atmosphere with exhaust gases; reducing heat generation by the outer surfaces of the oven; reducing irrational heat consumption in the baking chamber; high-quality fuel combustion; reducing steam consumption for hygrothermal treatment of dough pieces and, accordingly, reducing heat consumption to produce this steam [10-14, 18-20].

In order to determine the necessary functions of exhaust gases to increase the productivity of ovens with recirculation of combustion products, studies were conducted under variable conditions using a K-PHM-25 baking oven. The K-PHM-25 bakery oven is a metal block structure with a cradle conveyor and a channel heating system with forced gas recirculation. The oven is designed for baking wheat, rye and rye-wheat bread.



**Figure 1 – Baking oven K-PHM-25**

*1 – loading and unloading device; 2 – steam humidification system; 3 – all-metal construction; 4 – thermal insulation; 5, 13 – upper and lower heating channels; 6, 12 – upper and lower flues; 7 – furnace; 8 – mixing chamber; 9 – muffle; 10 – burner; 11 – baking chamber; 14 – cradle conveyor*



The baking oven is an all-metal structure assembled from separate modules and insulated from the outside (Fig. 1) and consists of a loading and unloading device 1, a steam humidification system 2, and a housing, which is an all-metal structure assembled from separate modules and insulated from the outside with mineral wool 4. In the middle of the furnace, there are upper 5 and lower 13 heating channels, above which there are upper 6 and lower 12 gas flues, respectively, which have gates for supplying heating gases.[15-17].

The furnace and igniter unit consists of a furnace 7, a mixing chamber 8, a muffle 9, and an igniter 10. Dough pieces are moved by a cradle conveyor 14. The heating gases are supplied to the gas flues of the baking chamber 11 by a recirculation fan.

The principle of operation of the oven is based on the supply of heating gases, which are obtained by burning fuel in the furnace 7, to the heating channels of the baking chamber 11, where the set temperature is maintained. Baking of dough pieces takes place on a cradle conveyor 14, which passes through the baking chamber 11 together with the dough pieces. The finished products are fed to the discharge conveyor by a special unloading device [21-24].

The study was carried out at LLC «Khmelnitsky Khib» during the baking of «Zapashny» bread with a weight of 0,77 kg in the entire range of productivity changes practically appropriate for this oven  $G = 0,068-0,078$  kg/s, (in percent)  $G = 100-114,7$  %, if the load  $G = 0,068$  kg/h is taken as 100%.

The main technological parameters of semi-finished products (sourdough, dough, dough pieces) were determined during the research: temperature, humidity, acidity, fermentation time, proofing and baking time.

The quality of the finished product was assessed by physicochemical (humidity, acidity, porosity) and organoleptic parameters (bread surface condition, porosity structure, elasticity and bakedness of the crumb, crust thickness).

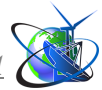
To evaluate the baking mode of the baking oven, the temperature of the baking environment, relative humidity, the temperature of the center of the bread crumb and crust were measured. During the study, the weight and baking of the dough piece, oven performance, fuel, steam, and electricity consumption were determined [25-30].

Table 1 shows that the dependences of the exhaust gas temperature  $t_{ex,g}$  and the heat loss with exhaust gases  $q_{ex,g}$  on the productivity  $G$  were linear.

**Table 1 – Changes in the exhaust gas temperature  $t_{ex,g}$  depending on the furnace capacity  $G$**

№	Productivity, kg/s	Exhaust gas temperature, °C	Heat loss with exhaust gases, %
1	0,068	300	7,5
2	0,071	316	7,8
3	0,075	320	8,0
4	0,078	338	8,3

At the same time, the average temperature of the exhaust gases, taking into account the burner performance, is approximated by the calculated dependence:



$$t_{\text{ex.g}} = 218 + 1485G, \text{ } ^\circ\text{C},$$

where G is the productivity, kg/s.

The linear dependence of the exhaust gas temperature on the furnace performance can be explained by analyzing the nature of the change in the main experimental and calculated operating parameters (Table 2). The parameters in Table 2 are given for clarity only for four characteristic modes that lie on the boundaries and in the middle of the studied performance range.

**Table 2 - Changes in the main experimental and calculated parameters of operation**

Parameters	Heating modes			
	1	2	3	4
Load G, % (kg/s)	100 (0,068)	105 (0,071)	110 (0,075)	114,7 (0,078)
Temperature of working gases $t_p$ , $^\circ\text{C}$	528	550	575	590
Fuel flow rate B, $\text{m}^3/\text{year}$	41,0	43,0	45,0	47,0
Volume of recirculated gases $V_{\text{rc}}$ , $\text{m}^3/\text{m}^3$	92	87	82	76
Air consumption coefficient in the working gases $\alpha_p$	2,8	2,76	2,72	2,7
Recycling coefficient r	2,68	2,56	2,31	2,22
Heat output of combustion products $\Delta I$ , $\text{MJ}/\text{m}^3$	20,1	19,3	18,7	18,3

Based on the data in Table 2, the components of the furnace heat balance were calculated. The results of the calculations are shown in Table 3. The heat loss for heating the ventilation air was calculated at an average productivity of 107,35 %.

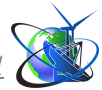
**Table 3 - Calculation of specific heat**

No	The type of heat consumption on:	Designation	Value, kJ/kg
1	baking	$q_1^{b.c}$	442
2	steam overheating	$q_2^{b.c}$	102
3	heating of ventilation air	$q_3$	255
4	heating of transportation devices	$q_4$	78
5	environment	$q_5$	40

Using analytical and experimental correlations, the fuel consumption for the idling of a baking oven, i.e., for the operation of the oven with normal thermal parameters (temperature in the baking chamber), but without production, was found. Calculations of the fuel consumption for the oven idling showed that  $I_c = 9,11 \text{ m}^3/\text{hour}$ .

The furnace idling factor is defined as the ratio of fuel consumption for furnace idling to fuel consumption at normal (calculated) furnace performance.

The furnace idling coefficient is 0,251 at a fuel consumption of  $43,0 \text{ m}^3/\text{t}$ .



**Conclusions.** In baking ovens, the volume of recirculating gases decreases with increasing load. This is due to the fact that the recirculation fan cannot change its characteristics when the oven capacity changes. At the same time, the change in the heat flow in the working chamber is determined by the change in the temperature head from the heating gases.

Based on the results obtained, it can be stated that the introduction of new energy-saving designs of baking ovens into production ensures an improvement in the quality of bakery products by means of zone regulation of energy supply and the use of radiation-convective heating systems with a developed heat exchange surface.

## References

1. Kravchenko M., Piddubnyi V., Romanovska O. Functional and technological properties of flour mixtures for dough. *International scientific-practical journal on commodities and markets*. 47(3).–2023.–P. 125–134.
2. Piddubnyi V., Sabadosh A., Mushtruk M., Chahaida A., Fedorov V., Kravcheniuk K., Krasnozhon S., Radchenko I. Innovative thermodynamic modeling for enhanced yeast dough mixing: energy perspectives and applications. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*.– 2024. – Vol. 18. – P. 251–267.
3. Piddubnyi, V., Stadnyk, I., Chahaida, A., Petrychenko, Y. Justification of mixer parameters for flour components. *Technical Engineering*.(1(89).–2022.–P.3-10.
4. Piddubnyy V., Kahanets-Havrylko L., Fedoriv V., Senchishin V., Stadnyk I. Peculiarities of heat exchange in dough under rotary rollers action. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. –Vol 109, № 1.).–2023– P. 43-53.
5. Samiilenko S., Bondar V., Piddubnyi V., Shutyuk V., Bilyk O., Fedoriv V. Thermodynamic Analysis of the Thermal Manufacturing Complex of Sugar Production: Criteria for Energy Efficiency of an Enterprise. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 3 (8(111) – P.6-13.
6. Stadnyk I., Piddubnyy V., Chagaida A., Fedoriv V. Dynamics of interaction of components during mixing. *Scientific Journal of TNTU*. — Tern.: TNTU, –2022. – Vol 107. № 3. – P. 86-98.
7. Stadnyk, I., Piddubniy, V., Krasnozhon, S., Kraevska, S. A scientific approach to the creation of food products with increased nutritional value. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 1(23-01) .–2022.–P.36-43.
8. Stadnyk I., Sokolenko A., Piddubnyy V., Vasylykivsky K., Chahaida A., Fedoriv V. Justification of thermodynamic efficiency of the new air heat pump in the system of redistribution of energy resources at the enterprise. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. – 2021. – Vol. 15. – P. 680-693.
9. Stadnyk I., Piddubnyi V., Chahaida A., Fedoriv V., Hushtan T, Kraievskaya S., Kahanets-Havrylko L., Okipnyi I. Energy Saving Thermal Systems on the Mobile Platform of the Mini-Bakery. *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering*.–2023. –Vol. 73(1), p.169-186.
10. Fedoriv V.M., Oleksandrenko V.P, Martynyuk A.V. Визначення конструктивних параметрів вібраційних просіювачів. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. – Issue №31, Part 1,– Karlsruhe.–2024.–P.3-8.



11. Fedoriv V.M., Stechyshyn M.S., Martynyuk A.V., Kurskoi V.S., Pereima A.R. Обґрунтування конструктивних параметрів віброзмішувачів для борошняних компонентів. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. – Issue №32, Part 1, – Karlsruhe.–2024.–P.11-19.
12. Fedoriv VM., Bondar A Y., Efimovich MO . Study of design parameters of vibrating sifters. *SWorld-Ger Conference Proceedings. The current stage of development of scientific and technological progress '2024*. –No. gec31-00(2024). – С. 3–6.
13. Fedoriv V.M., Stechyshyn M.S., Martynyuk A.V., Kurskoi V.S., Pereima A.R. Determination of the relative speed for screening bulk materials. *SWorld-Ger Conference Proceedings. Scientific and technological revolution of the XXI century '2024*. –No. gec32-00(2024). – С. 5–9.
14. Борук С.Д. Федоров В.М. Модернізація технологічних процесів харчових виробництв: навч.посібник. Чернівці : Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2022. 103с.
15. Визначення раціональних режимів роботи хлібопекарських печей / Р. В. Логвінський, О. В. Ковальов, В. В. Шутюк, В. П. Василів // *Збірник праць НУБіП України за підсумками III Міжн. наук.-практ. конф. молод. вч., асп. і студ.*– К., 2013. – С. 297-298.
16. Доломакин Ю.Ю., Ковалёв А.В., Глуздань А.А., Федоров В.М. Теплопоглощение тестовой заготовкой в процессе выпечки в конвективных хлебопекарных печах // *Ukrainian Food Journal*. – 2012. – № 2. – С. 84-87.
17. Ковальов О.В., Федорів В.М. Просіювання сипких матеріалів. *Харчова і переробна промисловість*. –2004. –№ 5. –С. 24-25.
18. Ковальов О.В., Бабко Є.М., Місечко М.О., Федорів В.М. Zeovac вакуумне охолодження - технологія майбутнього // *Хлебопекарное и кондитерское дело*. – 2010. –№2. – С.28-30.
19. Ковальов О.В., Логвінський Р.В., Федорів В.М. Виробництво житнього хліба у печах ФТЛ-2 // *XVI наукова конференція ТНТУ ім. І. Пулюя, 5-6 грудня 2012 р. : тези доп - 2012. - Том II*. – С. 118.
20. Ковальов О.В., Бурлака О.М., Бабко Є.М., Леметар С.Ю. Ефективність роботи хлібопекарських печей та шляхи їх удосконалення // *Хлебопекарское и кондитерское дело*, № 2, - 2007. с. 30 - 31.
21. Ковалёв А.В., Бурлака Е.Н., Мисечко Н.О., Федоров В.М. Теплопоглощение тестовой заготовкой в процессе выпечки // *Хлібопекарська і кондитерська промисловість України*. –№ 5, – 2008. – С. 36-37.
22. Ковалёв А.В., Бурлака Е.Н., Леметар С.Ю., Федоров В.М. Теплопоглощение тестовой заготовкой в конвективных хлебопекарных печах // *Хлебопекарское и кондитерское дело*. –№ 3. – 2008. – С. 48 - 49.
23. Пастух І. М. Особливості азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням отворів з відносно малим діаметром / І. М. Пастух, В. В. Люховець, В. С. Курской // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2013. – №3. – С. 195–199.
24. Стадник І.Я., Піддубний В. А., Федорів В. М., Хареба О. В. Підгорний В. В. Сучасні технології та енергетичні потоки при формуванні борошняних



напівфабрикатів. Монографія. Тернопіль: Ви-тво ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 372 с.

25. Стечишин М.С., Олександренко В.П., Лук'янюк М.В., Люховець В.В., Лук'янюк М.М. Технологія азотування в тліючому розряді сталей різального комплекту м'ясоподрібнювальних машин. Проблеми трибології. Хмельницький, 2017. № 2. С. 50–54.

26. Федорів В.М., Стадник І.Я., Бабко Є.М., Миколів І.М., Ковальов О.В. Ефективність процесу просіювання сипких матеріалів. Хранение и переработка зерна. – 2015. – №11-12. – С. 51-54.

27. Федорів В. М. Робочий зошит з устаткування закладів ресторанного господарства. Каталог «Відкритий урок: розробки, технології, досвід». – К.: Плеяда, 2018. – С.15.

28. Федорів В.М., Олександренко В.П., Мартинюк А.В. Експлуатація та обслуговування обладнання: навч. посіб. Хмельницький: ХНУ, 2024. 335 с.

29. Федорів В.М., Ковальов О.В., Миколів І.М. Встановлення оптимальних режимів роботи хлібопекарських печей // Наукові праці ОНАХТ, Вип. 45. – Одеса, 2014. – С.61–65.

30. Ялпачик В.Ф., Буденко С.Ф., Ялпачик Ф.Ю., Гвоздєв О.В., Циб В.Г., Бойко В.С., Самойчук К.О., Олексієнко В.О., Клевцова Т.О., Паляничка Н.О. Розрахунок обладнання харчових виробництв: Навчальний посібник. Мелітополь, 2014. – 264 с

**Анотація.** У статті розглядаються проблеми впливу раціональних режимів роботи хлібопекарських печей, що є важливою задачею роботи печі для значної економії палива. У хлібопекарських печах однією з основних величин, найбільш чутливою до зміни навантаження, є температура газів, що ідуть у навколишнє середовище.

Метою статті є оцінка процесу встановлення залежності температури відпрацьованих газів від продуктивності печі і визначення найбільш раціональної продуктивності для печей даного типу.

Для досягнення поставленої мети були виконанні наступні завдання: встановлені закономірності зовнішнього тепломасообміну при прогріванні тістових заготовок, що випікаються; встановлено закономірності внутрішнього тепломасообміну, в зоні фазового переходу тістових заготовок, що випікаються, хлібобулочних виробів; проведено комплексне дослідження впливу режиму радіаційно-конвективного випікання на показники якості хлібобулочних виробів і технологічні витрати, які обумовлені тепломасообміном в хлібопекарських печах; уточнено методику теплового розрахунку хлібопекарських печей для практичного використання при створенні енергозаощаджуючої техніки випікання хлібобулочних виробів.

**Ключові слова:** тістова заготовка, хлібобулочні вироби, хлібопекарська піч, раціональний режим, паливо, температура, теплота, продуктивність.

Article sent: 16.10.2024

© Fedoriv V.M., Liukhovets V.V. Mankov V.I., Stepanets O.V.