

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Нові рішення в
сучасних технологіях**

№ 1(19)' 2024

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2024

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: New solutions in
modern technology**

No. 1(19)' 2024

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI", 2024

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2024. — № 1(19). — 100 с. — ISSN 2079-5459.

Видання публікує наукові результати та досягнення мультидисциплінарних досліджень молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, техніки та електрофізики високих напруг, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, high voltage techniques and electrophysics, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Ідентифікатор медіа R30-02565, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 11.01.2024 № 33.

Мова статей – українська, англійська.

Офіційний сайт видання: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», **категорія «Б»** (накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р. та №886 від 02.07.2020 р.).

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

Сокол С. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Авдєєва О. П., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Байрачний В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Березка Т. О., НТУ «ХПІ», Україна

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Бурлака М. В., SoftInWay Inc., США

Глушко А. В., НТУ «ХПІ», Україна

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Гринченко Н. Г., доц., ХДУХТ, Україна

Данильченко Д. О., НТУ «ХПІ», Україна

Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Єнікєєв О. Ф., доц., ДДМА, Україна

Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Колодяжна Л. В., ІПМаш НАНУ, Україна

Костик К. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Мазасва В. С., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

Мінакова К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Моїсєєв В. Ф., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Ноздрачова К. Л., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Носенко Т. Т., проф., НУХТ, Україна

Папченко В. Ю., УкрНДІОЖ НАНУ, Україна

Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс, Бразилія

Пітак І. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Плеснецов С. Ю., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Руденко С. С., НДПІКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», Україна

Селін Р. В., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

Сучков Г. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Тихомірова Т. С., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Томашевський Р. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Філенко О. М., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Хохлов М. А., ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, Україна

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шестопалов О. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Шідакова-Камєнюка О. Г., доц., ХДУХТ, Україна

Editorial staff

Associate editor:

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of NASU, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Avdieieva O. P., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Bairachnyi V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Berezka T. O., NTU "KhPI", Ukraine

Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Burlaka M. V., SoftInWay Inc., United States

Glushko A. V., NTU "KhPI", Ukraine

Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK

Grynchenko N. G., docent, HDUHT, Ukraine

Danylchenko D. O., NTU "KhPI", Ukraine

Demidov I. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Yenikieiev O. F., docent, DSEA, Ukraine

Zakovorotniy A. Yu., prof., NTU "KPI", Ukraine

Kolodyazhnaya L. V., IPMash NASU, Ukraine

Kostyk K. O., prof., NTU "KPI", Ukraine

Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Mazaeva V. S., UkrRIOF NASU, Ukraine

Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine

Minakova K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Moiseev V. F., prof., NTU "KPI", Ukraine

Nozdrachova K. L., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Nosenko T. T., prof., NUFT, Ukraine

Papchenko V. Yu., UkrRIOF NASU, Ukraine

Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil

Pitak I. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Plesnetsov S. Yu., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Rudenko S. S., RDI "Molniya" NTU "KhPI", Ukraine

Selin R. V., E.O. Paton EWI NASU, Ukraine

Suchkov G. M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Tykhomyrova T. S., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Tomashevskiy R. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Filenko O. M., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Khokhlov M. A., E.O. Paton EWI NASU, Ukraine

Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Shidakova-Kamenyuka E. G., docent, HDUHT, Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 3 від 29 березня 2024 р.

UDC 621.039.586

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.01

ANALYSIS OF FINITE-DIFFERENCE APPROXIMATION OF CODE "FLOW" IN PERFORMING DESIGN CALCULATIONS OF PARAMETERS IN THE PRIMARY AND SECONDARY CIRCUITS OF VVER REACTOR PLANT

S. LYS*, O. YURASOVA, I. GALYANCHUK

Department of Heat Engineering, Thermal and Nuclear Power Plants, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE
*e-mail: Lysss@ukr.net

ABSTRACT In code package "FLOW" energy and coolant hydrodynamics equations, neutron kinetics equations and equations of heat conduction in metalwork and fuel rods are solved together. Processes described by these equations are characterized by different time constants and during calculation different degree of time and space discretization is required. The objective of the work was demonstration of stability of numerical schemes used in "FLOW" program and its modules, assessment of error of numerical solution for nodalization. Initial differential equations in partial derivative of the law of conservation of mass, energy and momentum are reduced to the system of usual differential equations on the basis of spatial approximation with the use of integro-interpolation method. Approximation was performed by integrating the initial differential equations in partial derivatives within the limits of each elemental volume of division by spatial coordinate. The usage of integro-interpolation method provides fulfilment of laws of conservation on computational mesh as a whole and the second order of approximation by spatial coordinate. The usage of integro-interpolation method provides fulfilment of laws of conservation on computational mesh as a whole (conservatism of approximation method) and the second order of approximation by spatial coordinate. Effect of limiting error of integration in "FLOW" code on pressure values at the core outlet and mass discharge from the leak is not practically distinguished. Effect of these errors on the values of coolant flow rates at the core inlet and outlet becomes more noticeable. Still, maximum value of these differences doesn't exceed 7 % for flow rate at the core inlet. More substantial differences (of the order of 10–15 %) are observed in the course of calculated temperature of fuel rod cladding.

Keywords: software package; hydrodynamics equations; neutron kinetics equations; code "FLOW"; finite-difference approximation

АНАЛІЗ КІНЦЕВО-РІЗНИЦЕВОЇ АПРОКСИМАЦІЇ КОДУ «FLOW» ПРИ ВИКОНАННІ ПРОЄКТНИХ РОЗРАХУНКІВ ПАРАМЕТРІВ ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО КОНТУРІВ РЕАКТОРА ВВЕР

С. С. ЛИС, О. Г. ЮРАСОВА, І. Р. ГАЛЯНЧУК

Кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ У кодовому пакеті «FLOW» спільно розв'язуються рівняння гідродинаміки енергії та теплоносія, рівняння нейтронної кінетики та рівняння теплопровідності в металоконструкціях і твелах. Процеси, що описуються цими рівняннями, характеризуються різними постійними часу і під час розрахунку необхідний різний ступінь часової та просторової дискретизації. Метою роботи була демонстрація стійкості чисельних схем, що використовуються в програмі «FLOW» та її модулів, оцінка похибки числового розв'язку для нодалізації. Вихідні диференціальні рівняння в частинних похідних закону збереження маси, енергії та імпульсу зведено до системи звичайних диференціальних рівнянь на основі просторової апроксимації з використанням інтегроінтерполяційного методу. Апроксимацію проводили шляхом інтегрування вихідних диференціальних рівнянь у частинних похідних у межах кожного елементарного об'єму ділення за просторовою координатою. Використання інтегроінтерполяційного методу забезпечує виконання законів збереження на розрахунковій сітці в цілому та другого порядку апроксимації за просторовою координатою. Використання інтегроінтерполяційного методу забезпечує виконання законів збереження на розрахунковій сітці в цілому (консервативність методу апроксимації) та другого порядку апроксимації за просторовою координатою. Вплив граничної похибки інтегрування в коді «FLOW» на значення тиску на виході з активної зони та масовий викид із витоків практично не розрізняється. Вплив цих похибок на значення витрат теплоносія на вході та виході з активної зони стає більш помітним. Однак максимальне значення цих відмінностей не перевищує 7 % для витрати на вході в активну зону. Більш суттєві відмінності (порядку 10–15 %) спостерігаються при розрахунковій температурі оболонки твелів.

Ключові слова: програмний комплекс; рівняння гідродинаміки; рівняння нейтронної кінетики; код «FLOW»; кінцево-різницева апроксимація

Introduction

"FLOW" code uses semi-rigid calculation model. All the structure of the primary circuit along the path of

coolant flow is broken down into elemental volumes (cells), which are combined into interconnected structural elements. The number of structural elements is determined by the necessity for consideration of all

circuit elements being under different operating conditions and simplification of calculation model as maximum as possible. The operating loop combines all operable loops. Such model is applied, if all operable loops are under similar conditions. The code allows to simulate up to four calculated loops being under different conditions (cooling water supply, power supply to reactor coolant pumps, connection of pressurizer and etc.) In any case the last calculated loop always corresponds to the emergency one and next to last calculated loop is used with "weight" equal to the number of remained loops, all of them being under similar conditions [1–5].

A degree of break-down of each structural element is determined by the objective of the calculation, but it is similar for all operable loops, geometrical and hydraulic characteristics of operable and emergency loops can be different.

In simulating the reactor pressure and collection chambers characteristics of each cell of these elements are assigned separately in connection with complexity of geometry of reactor chambers [1].

Cold pipelines can be included into any cell of RPC and hot ones - into any cell of RCC, respectively.

Pressurizer can be connected to any element of hot pipeline of the first operable or emergency loop.

In the emergency core cooling system, the following is singled out: passive unit - water accumulators being under gas pressure (maximum number of accumulators – four) and active unit - emergency injection pumps (maximum number – 12).

Both active and passive elements of ECCS can be connected to any cell of cold and hot pipelines of any loops and directly into reactor chambers.

Cells are connected with overflow lines which are characterized by pressure loss and sluggishness.

RCP sets can be included into any cell of cold pipelines of loops [1].

This calculation model allows to simulate leak from any element of the emergency loop or chambers of the reactor. In this case coolant leak either from one cell or, in case of double-ended outflowing, from two cells, being adjacent by the model, is provided for.

Each steam generator over the secondary circuit is represented by one special elemental volume wherein a calculated element of the varying volume is singled out. In this element coolant parameters above the steam-water mixture level are simulated [1, 3–5].

Steam lines are presented by one calculated volume connected with steam space of steam generators. Operation of feedwater supply system, turbine stop valves, steam dump valves, safety valves on steam generators, quick-acting shut-off valves is simulated.

The number of calculation volumes in the loops and chambers of the reactor is up to 100.

In the core there can be considered up to five channels, one of which simulates leaks (channels without fuel rods). The number of calculated volumes over channels height is up to 12, ten of them are over the heated part.

Integration step of thermohydraulic equation systems is limited by the length of minimum element of

the calculational model, so it is necessary to take into account this factor in compiling the calculation model. By the same reason artificially excessive values (to have possibility to simulate the certain conditions) of pressure loss coefficients shall be avoided [1].

List of the main calculated parameters

The results of calculations made by code package "FLOW" are recorded into three files [1]:

- file in which in the process of calculation with the time step assigned by the user instantaneous values of all parameters required for restart are recorded successively. This file can be also used for visual display by KORR module of RP parameters (RP elements) during moments of time fixed in this file;

- file with tables of time variation of separate RP parameters. It is used by KORR module in plotting time variation of these parameters;

- file in which all input data assigned by the user and tables with all main calculated parameters in all elements of the calculational model are recorded in the form convenient for the user. Recording of tables with the results is performed in the process time interval determined by the user.

Basically, tables of time variation of any parameter (temperature, pressure, specific enthalpy, void fraction, coolant flow rate, temperatures of metalwork and fuel at all calculated points and etc.) calculated in code package «FLOW» can be recorded. Total number of recorded parameters shall not exceed 150, though this limitation can be easily changed in any direction. However, as a result of experience of using code package "FLOW" in performing design calculations for NPP with VVER a specific list of these parameters was mainly composed taking into account the requirements of guidelines [1,6-14].

Code "FLOW" provide for recording tables of the following fixed parameters [1]:

- 1) nodal values of time;
- 2) values of pressure differential on the core;
- 3), 4) values of pressure at core inlet and outlet, respectively;
- 5), 6) values of specific enthalpy at core inlet and outlet, respectively;
- 7), 8) values of boric acid concentration at core inlet and outlet, respectively;
- 9) values of relative power in fuel;
- 10) pressure in the pressurizer;
- 11)...13) values of water volume (liquid phase) in the primary circuit, reactor and the reactor pressure chamber, respectively;
- 14), 15) values of mass and energy fluxes of the coolant flowing through break (breaks) in the primary circuit;
- 16) values of heat flux minimum departure from nucleate boiling in the core;
- 17) values of fuel maximum temperature;
- 18) values of total cooling water flow from ECCS;
- 19), 20) values of coolant flow rate at core inlet and outlet;

21) values of heat flow from fuel rod claddings to the coolant;

22), 23), 24) values of average density of the coolant, average temperature of fuel and maximum temperature of fuel rod claddings in the core, respectively.

Parameters 3) – 9) are also intended for using as boundary conditions during analysis of thermal-and-hydraulic situation in separate assemblies (channels) of the core by code.

Further in evaluating the calculation results the values of parameters, which are usually used in substantiating safety of RP with VVER, will be taken as the main ones [1]:

- coolant pressure in the primary circuit;
- coolant temperature in the secondary circuit;
- coolant temperature at the core outlet;
- coolant temperature at the reactor inlet;
- minimum value of heat flux DNB;
- maximum value of fuel rod claddings temperature;
- maximum value of fuel temperature;
- maximum value of depth of fuel rod claddings oxidation;
- quantity of oxidized zirconium in the core;
- reactivity in the core;
- mass discharge from the primary circuit;
- energy ejection from the primary circuit.

In substantiating the methods, the following problems can be chosen:

- analysis and substantiation of numerical schemes stability, sensitivity to input data and determination of error in numerical solution of the system of equations;
- check of programs capability in the field of application;
- programs testing by solving special problems and by comparison with calculation results of the other programs;
- comparison of calculation results with the results of experiments.

In this section the results of solution of the first problem – substantiation of numerical schemes stability, sensitivity to input data and determination of error in numerical solution of the system of equation – are presented [1].

Verification of codes by the results of experiments is given in [10].

In code package “FLOW” energy and coolant hydrodynamics equations, neutron kinetics equations and equations of heat conduction in metalwork and fuel rods are solved together. Processes described by these equations are characterized by different time constants and during calculation different degree of time and space discretization is required.

So, hydrodynamics equations taking into account coolant compressibility (“FLOW” code) with the use of explicit numerical schemes impose restriction on integration time step [1]

$$\Delta\tau \leq \frac{l}{|c|+|w|}, \Delta\tau \sim 0,001 \text{ s.} \quad (1)$$

Equation of motion for incompressible coolant – restriction

$$\Delta\tau \leq \frac{l}{\xi|w|}, \Delta\tau \sim 0,01 \text{ s.} \quad (2)$$

Energy and mass equations - respectively restrictions

$$\Delta\tau \leq \frac{M}{\sum|G|}, \Delta\tau \sim 0,1 \text{ s.} \quad (3)$$

$$\Delta\tau \leq \frac{U}{\sum|G \cdot i| + |Q|}, \Delta\tau \sim 0,1 \text{ s.} \quad (4)$$

Equations of heat conduction –

$$\Delta\tau \leq \frac{\delta^2 \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda}, \Delta\tau \sim 0,1 \text{ s.} \quad (5)$$

Neutron kinetics equations –

$$\Delta\tau \leq \frac{L}{\beta}, \Delta\tau \sim 0,0001 \text{ s.} \quad (6)$$

Equations use the following symbols given in Table 1 [1].

Table 1 – The symbols for the equations in this work

Symbols	Clarifications
c	Isoentropic sound velocity in coolant
c_p	Metal heat conduction
G	Coolant flow rate in junction (summation for all junctions being adjacent the given calculated element)
$G \cdot i$	Enthalpy flow in junction (summation for all junctions being adjacent the given calculated element)
L	Prompt neutron life
l	Spatial coordinate step (length of nodes)
M	Coolant mass in the node
Q	Thermal flow to coolant in the considered node
U	Internal energy of coolant in the node
β	Total fraction of delayed neutrons
δ	Thickness of calculated layer (spatial coordinate step in metal)
λ	Metal heat conduction
ρ	Metal density
w	Coolant velocity
ξ	Pressure loss coefficient
$\Delta\tau$	Time integration step

It is clear from the equations that values of typical time for different processes vary within the wide range (from 0,1 to 0,0001 s) and solution of the system of equations required combination of different numerical schemes [1].

For example, the last restriction is stricter and it required the usage of the special method of integration. The first restriction also resulted in introduction into code "FLOW" of subroutines implementing algorithm of implicit method for solution of the system of hydrodynamics equations in the primary circuit together with the usage of explicit scheme.

The objective of the work

The objective of the work is demonstration of stability of numerical schemes used in "FLOW" program and its modules, assessment of error of numerical solution for nodalization.

Substantiation of finite-difference approximation of code "FLOW"

Initial differential equations in partial derivative of the law of conservation of mass, energy and momentum are reduced to the system of usual differential equations on the basis of spatial approximation with the use of integro-interpolation method. Approximation was performed by integrating the initial differential equations in partial derivatives within the limits of each elemental volume of division by spatial coordinate [1].

The usage of integro-interpolation method provides fulfilment of laws of conservation on computational mesh as a whole (conservatism of approximation method) and the second order of approximation by spatial coordinate.

The figure represents cells V_i, V_j, V_k, V_l with centres of mass Z_i, Z_j, Z_k, Z_l , respectively. Arrows designate directions of coolant movement under steady-state conditions. Variation of flow area and local pressure loss are considered to be concentrated at the points of cells junction (in figure $\bar{Z}_i, \bar{Z}_j, \bar{Z}_k, \bar{Z}_l$). l_i – length of i-element in direction of axis Z_1 ; H_i – length of projection of i-element to the vertical; G_j – coolant flow rate through junction at point \bar{Z}_j ; G_i – coolant flow rate at point Z_i – in the centre of mass of cell V_i .

The systems of usual differential equations, obtained as a result of spatial approximation of Cauchy problem, are integrated with the use of any of the following methods: special method based on the usage of the implicit scheme in combination with Neuton method; Euler-Cauchy method of the second order of accuracy with automatical choice of integration step.

Calculation of the accident conditions with break of the main coolant pipeline (MCP) at the reactor inlet by "FLOW" program was carried out with the use of calculational nodalization models. Nodalization (four-loop) corresponds to break-down of the primary circuit which is recommended for the design projects. The necessity for performance of calculation of a variant with three cooling loops is caused by: requirements of testing the algorithms of both control programs and subroutines of package "FLOW" as well as requirements in large number of calculational sections in substantiating finite difference approximation [1–5].

Curves, reflecting variation of desired variables, obtained in calculations with the use of four-loop nodalization model are given in Fig. 1–3, in this case the limiting error of integration ($\epsilon=0,0005$, or $0,00025$, or $0,0001$), controlling the actual choice of time step is a parameter. Calculation of the transient with MCP break at the reactor inlet is carried out before reaching the steady-state conditions of cooling in the core which takes place after 140 s (if to trace the transient by pressure – Fig. 1 and by fuel temperature – Fig. 3), or after 100 s (by maximum claddings temperature, Fig. 3) [1].

As is well seen in Fig. 1 and 2 effect of limiting error of integration in "FLOW" code on pressure values at the core outlet and mass discharge from the leak is not practically distinguished. Effect of these errors on the values of coolant flow rates at the core inlet and outlet becomes more noticeable. Still, maximum value of these differences doesn't exceed 7 % for flow rate at the core inlet. More substantial differences (of the order of 10–15 %) are observed in the course of calculated temperature of fuel rod cladding, Fig. 3 [1].

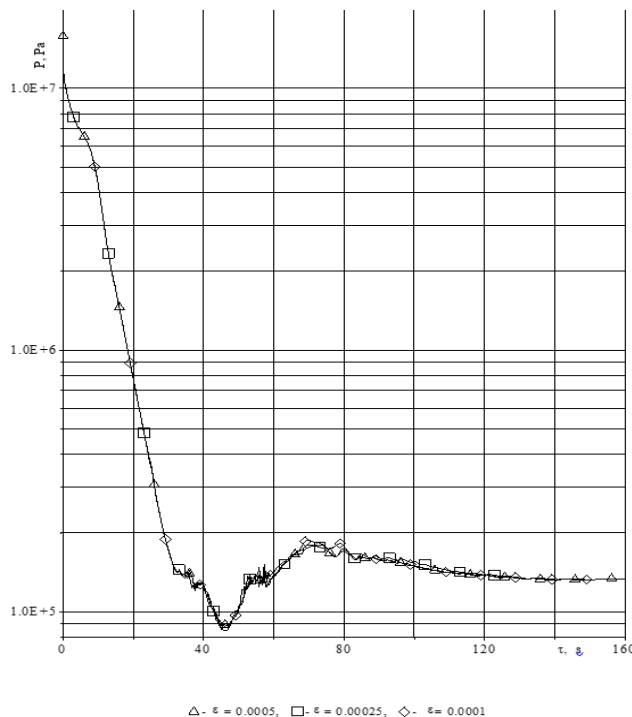


Fig. 1 – Effect of limiting error of integration on pressure at the core outlet

Effect of spatial discretization on the behaviour of the most sensitive parameters such as temperatures in the centre of fuel and temperatures of fuel rod cladding at different elevations of the core is shown in Fig. 4 and 5 [1]. In general, equidistance shall be noted in the course of curves of fuel and cladding temperatures during the whole transient, that shows stability and convergence of algorithm of calculation. Available variations of calculated temperatures of small amplitude are caused by its crude approximation with the use of crude calculation mesh and differences, connected with it, don't exceed 100 °C, that is equal to not more than 10 % within the

given range of temperatures variation. The general trend is some overestimation of temperatures during calculations using more crude mesh: as a rule, all curves (with a smaller number of sections) go higher. The considered accident conditions with MCP break result in variation of the desired parameters within the wide range and are characterized by large non-linearities resulting in high requirements for the used algorithm of calculation.

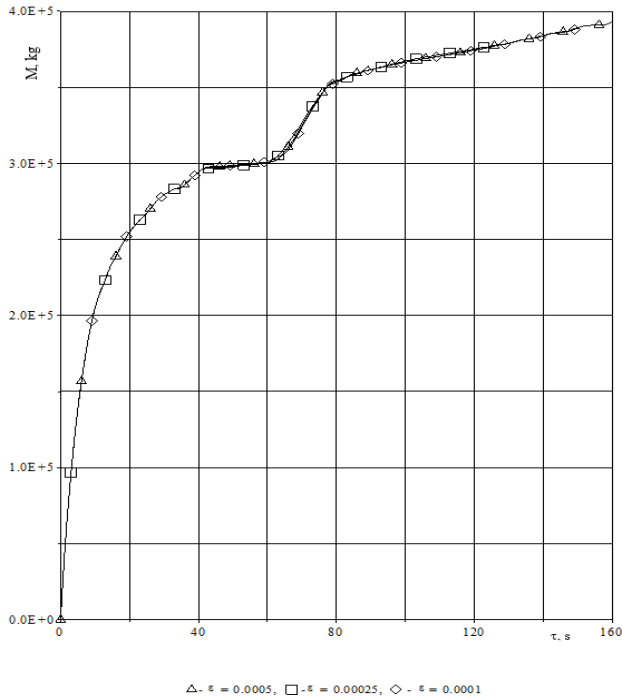


Fig. 2 – Effect of limiting error of integration on the calculated mass discharge from leaks

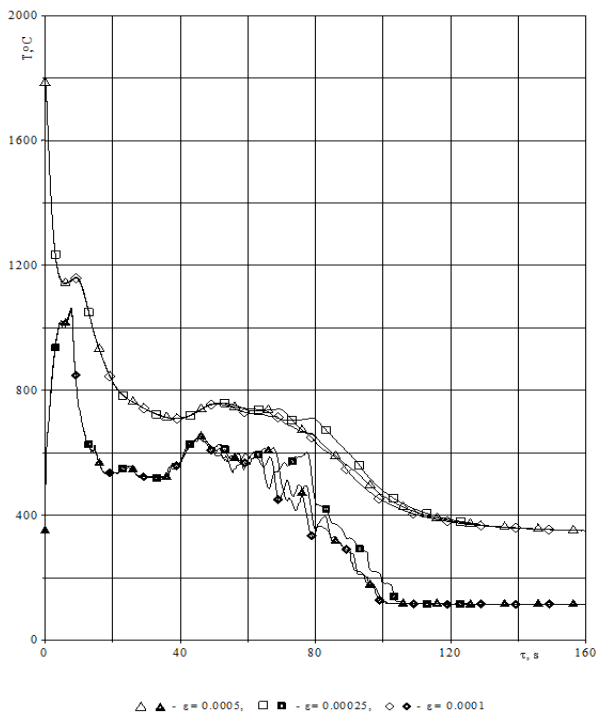


Fig. 3 – Effect of limiting error of integration on maximum calculated temperatures of fuel and fuel rod cladding

The presented results show quite adequate behaviour of the desired variables, stability and convergence of the obtained results in decreasing parameters of spatial-time discretization of the calculation mesh.

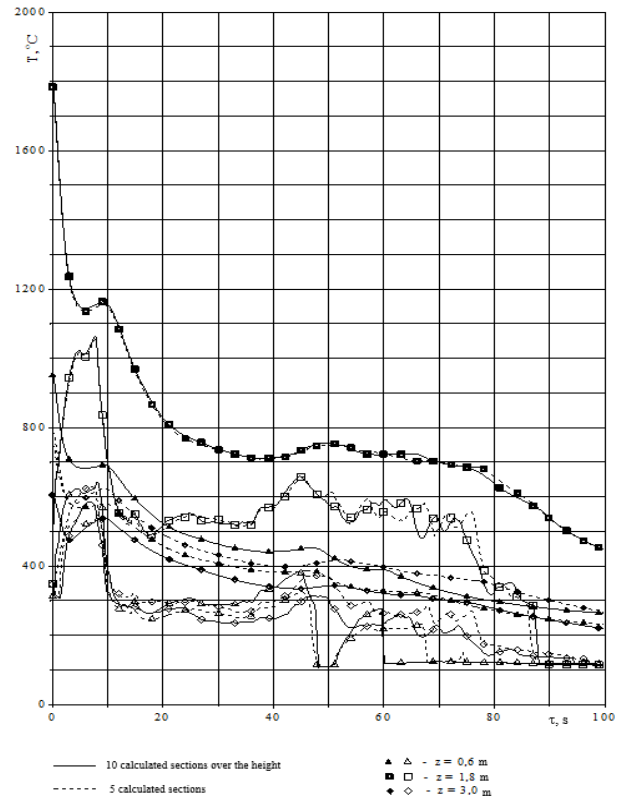


Fig. 4 – Temperatures of fuel in the centre and fuel rod cladding in different sections over the height

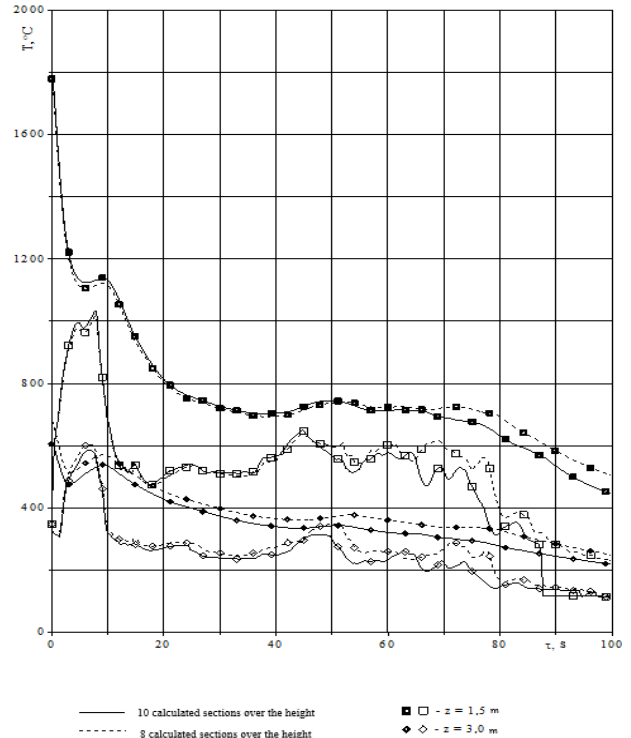
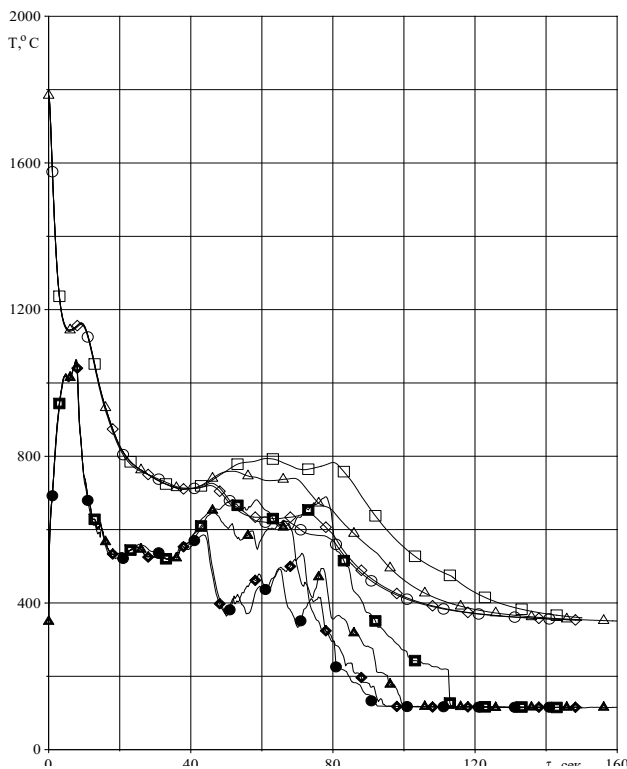


Fig. 5 – Temperatures of fuel in the centre and fuel rod claddings in the central and upper sections $Kr=1,74$

The next series of calculations showed the effect of nodalization of the primary circuit and the model of water supply by ECCS pumps on the calculation results of these conditions. The design (four-loop) variant of calculation of the accident conditions with MCP break at the reactor inlet shown above was taken as the initial one. The core was simulated by 10 sections and error of integration was accepted to be equal to $\varepsilon = 0,0005$. Transfer to three-loop variant of nodalization model of calculation with different, alternative variants of water supply from ECCS pump as well as with increased number of calculated sections in loops has been considered.

Fig. 6 demonstrates behaviour of the same calculated parameters that are mentioned above. In this case the main design variant with water supply by one pump of ECCS to the second loop and by one pump to the emergency loop practically coincides with a version of supply by one pump (equally) to the second and third loops and by one pump to the emergency loop, but as filling of serviceable loops by water from ECCS pumps occurs slower, the process of the core cooling is slightly protracted, see Fig. 6.



- △ - four loops water supply by ECCS pump into the second and emergency loops, 16 (17) sect. in each loop;
- - the same, but ECCS water, supplied into the second loop, is supplied into the second and third loops;
- ◇ - three loops, ECCS water supply into the second and emergency loops;
- - the same, but 24 sections – in each loop (in emergency loop – 25).

Fig. 6 – Maximum temperatures of fuel and fuel rods cladding

In case of three-loop nodalization model of calculation with increased water supply from ECCS to the second (two pumps, loop has “weight” 2) loop and by one pump to the emergency loop (symbol - ◇) the process of core cooling takes place more actively. In the variant with the same scheme of water supply by ECCS pumps, but with the increased number of sections by a factor of one and a half in the loops (symbol - O) cooldown takes place, practically for the same time, but there are noticeable differences in behaviour of temperature curves, Fig. 6. These differences reach 20 %, but they are not fundamental as they appear in the process of fuel rods cooling at values of cladding temperatures being about two times less than maximum values. At the stage of fuel rod heating-up and in the area of maximum values of temperatures (the first 25 s of the process) differences in temperatures don't exceed 1 %. In general, comparison of the main and two last variants show good convergence of the results with the increased number of calculated sections in the loops.

Analysis of stability by input data

Numerical stability by the input data is provided by conservatism of the used difference schemes, stability of the used numerical schemes and calculated processes (natural mechanism of self-regulation), continuity and differentiability of the right parts of differential equations. Exceptions are equations simulating operation of the systems of protection and interlockings where breaks are possible in the right parts of equations due to assumptions of “instantaneous” opening of some valves (for example, on the pressurizer), “instantaneous” connection of separate systems (for example, systems of standard make-up of the primary circuit) [1]. Presence of such breaks decreases an order of approximation of differential equations by a difference scheme and reaching the conditions for actuation of such systems, naturally, qualitatively affect the calculation results and it is apparently not difficult to invent such conditions when little variation of any input parameter, for example, pressure in the primary circuit under nominal conditions will result in qualitative variation of solution due to either opening or failure to open of the safety valve on the pressurizer.

However, such factors as actuation of the mentioned systems of protection and interlocking, which qualitatively affect the processes in the plant, are the subject of special study in the project and in choosing the conditions for their actuation much higher values of tolerance and conservatism than errors in calculations of parameters given in [1] are provided for.

Conclusions

The results of solution substantiation of numerical schemes stability, sensitivity to input data and determination of error in numerical solution of the system of equation are presented.

In code package “FLOW” energy and coolant hydrodynamics equations, neutron kinetics equations and equations of heat conduction in metalwork and fuel rods

are solved together. Processes described by these equations are characterized by different time constants and during calculation different degree of time and space discretization is required.

The stability of numerical schemes used in "FLOW" program and its modules, assessment of error of numerical solution for nodalization, is demonstrated. Initial differential equations in partial derivative of the law of conservation of mass, energy and momentum are reduced to the system of usual differential equations on the basis of spatial approximation with the use of integro-interpolation method. Approximation was performed by integrating the initial differential equations in partial derivatives within the limits of each elemental volume of division by spatial coordinate.

The usage of integro-interpolation method provides fulfilment of laws of conservation on computational mesh as a whole (conservatism of approximation method) and the second order of approximation by spatial coordinate.

Effect of limiting error of integration in "FLOW" code on pressure values at the core outlet and mass discharge from the leak is not practically distinguished. Effect of these errors on the values of coolant flow rates at the core inlet and outlet becomes more noticeable. Still, maximum value of these differences doesn't exceed 7 % for flow rate at the core inlet. More substantial differences (of the order of 10–15 %) are observed in the course of calculated temperature of fuel rod cladding.

List of abbreviations

DNB	- departure from nucleate boiling
ECCS	- emergency core cooling system;
MCP	- main coolant pipeline;
NPP	- nuclear power plant;
RCC	- reactor collection chamber;
RP	- reactor plant;
RPC	- reactor pressure chamber;
VVER	- water-cooled water-moderated power reactor.

Список літератури

1. Preliminary safety analysis report. Topical Report. Description of methods and computer codes used in thermal-hydraulic safety analyses. KK.0 UJA.JA.TM.TR.PR009. 412-Пр-205. 2000.
2. Semerak M., Koba K., Lys S., Kravets T. Software and Technical Complex of Control Basic Parameters of Reactor Installation. 2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), 2022. P.482–485. doi: 10.1109/CSIT56902.2022.10000463.
3. Mohamed Y. M. M., Abdelfattah Y. S., Mohamed A. E. A.-R. Thermal-hydraulic and solid mechanics safety analysis for VVER-1000 reactor using analytical and CFD approaches. *Progress in Nuclear Energy*. 2020. Vol. 130. doi: 10.1016/j.pnucene.2020.103568.
4. Osmachkin V. S., Borisov V. D. Pressure drop and heat transfer for flow of boiling water in vertical rod bundles. *Reprint of a paper presented at the 4-th International Transfer Conferense*. Versall, September, 1970.

5. Astakhov V. I., Bezrukov Yu. A. [et al.] Study of influence of linear heat rate upon DNB in the rod bundles. *Seminar ThPh-78*. CMEA. 1978. Vol. 2.
6. Smolin V. N., Polyakov V. K. Calculation procedure of DNB at coolant boiling in the rod bundles. *Seminar ThPh-78*. CMEA. 1978. Vol. 2.
7. Lys S. S., Semerak M. M., Kanyuka A. I. Analysis of reliability of automatic core protection function of the reactor V-412 in response to local parameters: maximum linear power, departure from nucleate boiling ratio. *Problems of atomic science and technology*. 2021. № 5 (135). P. 88–97. doi: 10.46813/2021-135-088.
8. Lys S., Kanyuka A. Analysis of fuel rod performance per cycle: Temperature field, FGP release, swelling. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021. Vol. 25. P. 100961. doi: 10.1016/j.tsep.2021.100961.
9. Tverskoy Yu. S. *Theory and technology of control systems. Multifunctional process control systems for thermal power plants. B. 2. Design: Monograph*. FGBOU VPO ISPU, 2013, 432 p.
10. Preliminary safety analysis report. Topical report. Description of computer codes and methods of experimental verification used in thermal-hydraulic safety analyses. 412-Пр-206, 2000.
11. Moustafa M., Ruifeng T., Bo W., Wen J., Ullah A., Alm ElDin Mohamad H. A detailed experimental evaluation of gas – Liquid film attributes in a horizontal rectangular duct by Planar Laser-Induced fluorescence (PLIF) approach. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. Vol. 408. P. 112331. doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112331.
12. Dolganov K. S. Possibility of misleading readings of water level in VVER steam generator during severe accidents with account for the Fukushima lessons. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. Vol. 413. P. 112519. doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112519.
13. Dillon R. Shaver, Tomboulides A., Obabko A., Fang J., Saini N. Demonstration of RANS models with wall functions in the spectral element code Nek5000. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. Vol. 408. P. 112302. doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112302.
14. Kropaczek D. J., Salko R. K., Hizoum B., Collins B. S. Advanced two-phase subchannel method via non-linear iteration. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. Vol. 408. P. 112328. doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112328.

References (transliterated)

1. Preliminary safety analysis report. Topical Report. Description of methods and computer codes used in thermal-hydraulic safety analyses. KK.0 UJA.JA.TM.TR.PR009. 412-Пр-205. 2000.
2. Semerak M., Koba K., Lys S., Kravets T. Software and Technical Complex of Control Basic Parameters of Reactor Installation. 2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), 2022, pp.482–485, doi: 10.1109/CSIT56902.2022.10000463.
3. Mohamed Y. M. M., Abdelfattah Y. S., Mohamed A. E. A.-R. Thermal-hydraulic and solid mechanics safety analysis for VVER-1000 reactor using analytical and CFD approaches. *Progress in Nuclear Energy*, 2020, Vol. 130, doi: 10.1016/j.pnucene.2020.103568.
4. Osmachkin V. S., Borisov V. D. Pressure drop and heat transfer for flow of boiling water in vertical rod bundles. *Reprint of a paper presented at the 4-th International Transfer Conferense*, Versall, September, 1970.

5. Astakhov V. I., Bezrukov Yu. A. [et al.] Study of influence of linear heat rate upon DNB in the rod bundles, *Seminar ThPh-78*, CMEA, 1978, Vol. 2.
6. Smolin V. N., Polyakov V. K. Calculation procedure of DNB at coolant boiling in the rod bundles. *Seminar ThPh-78*, CMEA, 1978, Vol. 2.
7. Lys S. S., Semerak M. M., Kanyuka A. I. Analysis of reliability of automatic core protection function of the reactor V-412 in response to local parameters: maximum linear power, departure from nucleate boiling ratio. *Problems of atomic science and technology*, 2021, 5 (135), pp. 88–97, doi: 10.46813/2021-135-088.
8. Lys S., Kanyuka A. Analysis of fuel rod performance per cycle: Temperature field, FGP release, swelling. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, Vol. 25, p. 100961, doi: 10.1016/j.tsep.2021.100961.
9. Tverskoy Yu. S. *Theory and technology of control systems. Multifunctional process control systems for thermal power plants. B. 2. Design: Monograph*. FGBOU VPO ISPU, 2013, 432 p.
10. Preliminary safety analysis report. Topical report. Description of computer codes and methods of experimental verification used in thermal-hydraulic safety analyses. 412-Пр-206, 2000.
11. Moustafa M., Ruifeng T., Bo W., Wen J., Ullah A., Alm EIDin Mohamad H. A detailed experimental evaluation of gas – Liquid film attributes in a horizontal rectangular duct by Planar Laser-Induced fluorescence (PLIF) approach. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, Vol. 408, p. 112331, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112331.
12. Dolganov K. S. Possibility of misleading readings of water level in VVER steam generator during severe accidents with account for the Fukushima lessons. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, Vol. 413, p. 112519, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112519.
13. Dillon R. Shaver, Tomboulides A., Obabko A., Fang J., Saini N. Demonstration of RANS models with wall functions in the spectral element code Nek5000. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, Vol. 408, p. 112302, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112302.
14. Kropaczek D. J., Salko R. K., Hizoum B., Collins B.S. Advanced two-phase subchannel method via non-linear iteration. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, Vol. 408, 112328, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112328.

Відомості про авторів (About authors)

Лис Степан Степанович – кандидат технічних наук, доцент; доцент, кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0002-7359-1177; e-mail: lysss@ukr.net;

Lys Stepan – Ph. D., Department of Heat Engineering, Thermal and Nuclear Power Plants, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7359-1177; e-mail: lysss@ukr.net.

Юрасова Оксана Георгіївна – кандидат технічних наук; доцент, кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0001-9930-9152; e-mail: oksjanchyk@gmail.com

Yurasova Oksana – Ph. D., Department of Heat Engineering, Thermal and Nuclear Power Plants, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9930-9152; e-mail: oksjanchyk@gmail.com

Галянчук Ігор Романович – кандидат технічних наук; доцент, кафедра теплоенергетики, теплових і атомних електричних станцій, Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0001-6242-1749; e-mail: ihor.r.halianchuk@lpnu.ua

Galyanchuk Igor – Ph. D., Department of Heat Engineering, Thermal and Nuclear Power Plants, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6242-1749; e-mail: ihor.r.halianchuk@lpnu.ua

Please cite this article as:

Lys S., Yurasova O., Galyanchuk I. Analysis of finite-difference approximation of code “FLOW” in performing design calculations of parameters in the primary and secondary circuits of PWR. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 3–10, doi: 10.20998/2413-4295.2024.01.01.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лис С. С., Юрасова О. Г., Галянчук І. Р. Аналіз кінцево-різницевої апроксимації коду «FLOW» при виконанні проектних розрахунків параметрів першого та другого контурів реактора ВВЕР. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 3–10. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.01.

*Надійшла (received) 17.01.2024
Прийнята (accepted) 04.03.2024*

УДК 661:620

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.02

ПРИКЛАД СИНЕРГІЇ ПІДХОДІВ ЗЕЛЕНОЇ ХІМІЇ ТА ЗЕЛЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

**С. О. ПЕТРОВ¹, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО², С. А. КУЦЕНКО¹, Т. В. ФАЛАЛЄЄВА¹,
Ю. В. ПЕТРОВА³, К. О. МІНАКОВА⁴**

¹ кафедра органічного синтезу та фармацевтичних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

² кафедра передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

³ кафедра ливарного виробництва, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

⁴ кафедра фізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

* e-mail: serhii.petrov@khpі.edu.ua

АНОТАЦІЯ Розглядаються актуальні виклики сучасного світу, пов'язані з кліматичними змінами, забрудненням довкілля, виснаженням природних ресурсів та зростанням енергетичних потреб. У статті пропонуються нові підходи до виробництва, використання та утилізації хімічних продуктів та енергії, які були б сталі, ефективні, безпечні та конкурентоспроможні. Зелена хімія та зелена енергетика виступають як два важливих напрямки, які спрямовані на мінімізацію або усунення використання та утворення небезпечних речовин, використання відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та рекуперації, а також створення продуктів, які були б сумісні з принципами кругової економіки та сталого розвитку. Акцентовано увагу на тому, що зелена хімія та зелена енергетика не можуть бути розглянуті як ізольовані сфери, а повинні бути інтегровані в синергійний спосіб, щоб досягти більшої ефективності та стійкості. Матеріал представлено у трьох змістовних розділах: перший розділ присвячений зеленій хімії, другий розділ – зеленій енергетиці, а третій розділ – розглядає приклад синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості. У роботі досліджено один з варіантів синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики на прикладі одночасного рішення проблеми засмічення охолоджуючого ставка електростанції водоростями і використанням цих водоростей, як альтернативної, економічно вигідної сировини для виробництва біологічно-активних добавок та барвників. На прикладі запропонованого виробництва, було досліджено основні принципи, напрямки та приклади синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості, а також зроблена оцінка переваг, викликів та перспективи такої синергії. Оцінка переваг та недоліків довела, що синергійний підхід до зеленої хімії та енергетики є ефективним, тому що він дозволяє досягати більшої економії ресурсів, зменшення викидів та відходів, покращення якості продуктів та збільшення конкурентоспроможності. Такий підхід також сприяє створенню інноваційних рішень, які враховують потреби сталого розвитку та кругової економіки. У результаті досліджень було виявлено, що інтеграція підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловість вимагає додаткових наукових досліджень та розвитку для вирішення ряду проблем та викликів. Тому в роботі акцентовується увага на необхідності до активізації наукової, освітньої, державної та громадської діяльності, спрямованої на підтримку та розвиток синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості, як одного з ключових факторів сталого розвитку України.

Ключові слова: зелена хімія; зелена енергетика; технологія виробництва; відновлювальна сировина; БАД; барвники.

AN EXAMPLE OF THE SYNERGY OF THE APPROACHES OF GREEN CHEMISTRY AND GREEN ENERGY

**S. PETROV¹, D. DANYLCHENKO², S. KUTSENKO¹, T. FALALIEIEVA¹,
Y. PETROVA³, K. MINAKOVA⁴**

¹ Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

² Electrical Power Transmission Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

³ Foundry Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

⁴ Physics Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The current challenges of the modern world related to climate change, environmental pollution, depletion of natural resources, and growing energy needs are examined. New approaches to the production, use and disposal of chemical products and energy that would be sustainable, efficient, safe and competitive are proposed. Green chemistry and green energy are two important areas that are aimed at minimizing or eliminating the use and generation of hazardous substances, the use of renewable energy sources, the improvement of energy efficiency and recovery, as well as the creation of products that would be compatible with the principles of a circular economy and sustainable development. The article focuses on the fact that green chemistry and green energy cannot be considered as isolated areas, but must be integrated in a synergistic way to achieve greater efficiency and sustainability. The article consists of three substantive sections: the first section is devoted to green chemistry, the second section - on green energy, and the third section - considers an example of the synergy of green chemistry and green energy approaches in industry. In the work, one of the options for the synergy of the approaches of green chemistry and green energy is investigated, using the example of a simultaneous solution to the problem of clogging the cooling pond of the power plant with algae and the use of these algae as an

alternative, economically profitable raw material for the production of biologically active additives and dyes. In this article, on the example of the proposed production, the main principles, directions and examples of synergy of green chemistry and green energy approaches in industry were investigated, as well as an assessment of the advantages, challenges and prospects of such synergy was made. The assessment of advantages and disadvantages proved that a synergistic approach to green chemistry and energy is effective because it allows to achieve greater savings of resources, reduction of emissions and waste, improvement of product quality and increase of competitiveness. This approach also contributes to the creation of innovative solutions that take into account the needs of sustainable development and the circular economy. As a result of the work, it was found that the integration of green chemistry and green energy approaches in industry requires additional scientific research and development to solve a number of problems and challenges. Therefore, the work emphasizes the need to intensify scientific, educational, state and public activities aimed at supporting and developing the synergy of green chemistry and green energy approaches in industry, as one of the key factors of sustainable development of Ukraine.

Keywords: green chemistry; green energy; production technology; renewable raw materials; nutritional supplements; dyes

Вступ

Сучасний світ зіткнувся з небувалими викликами, пов'язаними з кліматичними змінами, забрудненням довкілля, виснаженням природних ресурсів та зростанням енергетичних потреб. Ці виклики вимагають нових підходів до виробництва, використання та утилізації хімічних продуктів та енергії, які були б сталі, ефективні, безпечні та конкурентоспроможні. У цьому контексті, зелена хімія та зелена енергетика виступають як два важливих напрямки, які спрямовані на мінімізацію або усунення використання та утворення небезпечних речовин, використання відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та рекуперації, а також створення продуктів, які були б сумісні з принципами кругової економіки та сталого розвитку.

Однак, зелена хімія та зелена енергетика не можуть бути розглянуті як ізольовані сфери, а повинні бути інтегровані в синергійний спосіб, щоб досягти більшої ефективності та стійкості. Синергія підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості означає використання зеленої хімії як інструменту для зменшення споживання енергії, викидів та відходів в хімічних процесах, а також використання зеленої енергетики як джерела для забезпечення хімічних процесів відновлюваною, чистою та доступною енергією. Така синергія може призвести до покращення якості продуктів, зниження вартості виробництва, збільшення конкурентоспроможності, а також до позитивного впливу на навколишнє середовище та суспільство.

Аналіз досліджень і публікацій

Зелена енергетика – це напрямок енергетики, який передбачає використання відновлюваних джерел енергії, енергоефективності, рекуперації та екологічності. Україна має ряд стратегій, підходів та документів, які спрямовані на підтримку та розвиток зеленої енергетики, таких як:

проект Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року [1], який презентовано Міністерством енергетики та захисту довкілля України у січні 2020 року. Цей документ визначає національну ціль з енергоефективності, частку відновлюваних джерел енергії, зменшення

видобувних галузей та вугільних ТЕС, перехід до кругової економіки та інтеграцію енергетичних ринків України з європейськими;

Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року [2], який затверджено Кабінетом Міністрів України у грудні 2021 року. Цей документ встановлює національну ціль з енергоефективності до 2030 року, а саме: первинне та кінцеве споживання енергії в Україні у 2030 році не повинне перевищувати відповідно 91 468 тис. та 50 446 тис. тонн нафтового еквіваленту. Також Національним планом встановлюються та описуються низка горизонтальних та секторальних заходів щодо досягнення зазначеної мети (в сферах житлових та бюджетних будівель, транспорту, промисловості, енергетики);

огляд Стратегії енергетичної безпеки України від Європейсько-Українського Енергетичного Агентства (ЄУЕА) [3], який опубліковано у лютому 2020 року. Цей документ аналізує сильні та слабкі сторони, можливості та загрози для енергетичної безпеки України, а також надає рекомендації щодо забезпечення стабільності, надійності, доступності та сталості енергетичного сектору України.

Зелена хімія та технології – це напрямок, який спрямований на зменшення або усунення використання та генерації небезпечних речовин у хімічних процесах та продуктах. Це сприяє збереженню ресурсів, захисту довкілля та забезпеченню здоров'я людей.

У світі існує багато стратегій, підходів та документів, що підтримують та розвивають «зелену» хімію та технології. Одним з найважливіших є Цілі сталого розвитку (ЦСР), які були ухвалені Організацією Об'єднаних Націй у 2015 році [4] як універсальний заклик до дій щодо скорочення бідності, захисту планети та забезпечення миру та процвітання для всіх людей. ЦСР містять 17 цілей та 169 завдань, які враховують різні аспекти сталого розвитку, включаючи «зелену» хімію та технології. Наприклад, Ціль 7 передбачає забезпечення доступу до відновлюваних джерел енергії, Ціль 9 – побудову стійкої інфраструктури та сприяння інноваціям, Ціль 12 – впровадження відповідального споживання та виробництва, Ціль 13 – боротьбу зі зміною клімату, Ціль 14 – збереження морських екосистем, Ціль 15 – збереження екосистем суходолу.

Таким чином ми бачимо, що в глобальній ініціативі «Зелена» енергетика та «Зелена» хімія та технології невід'ємно пов'язані для досягнення поставлених цілей.

Іншим цікавим документом з цієї теми є доповідь Програми розвитку ООН (ПРООН) про соціальні та економічні переваги глобальної «зеленої революції» [5], яка аналізує як посилені короткострокові кліматичні зобов'язання, відомі як національно визначені внески (НВВ), так і довгострокові стратегії, в яких країни описують свої плани щодо досягнення нульового рівня викидів. У доповіді представлені підходи, що застосовуються у п'яти країнах, які ведуть процес справедливого переходу: Антигуа та Барбуда, Коста-Ріка, Індія, Сербія та Південна Африка. У доповіді також визначено п'ять ключових способів, за допомогою яких справедливий перехід може допомогти в реалізації Паризької угоди.

Незважаючи на те, що питання пов'язані з «Зеленою» енергетикою та «Зеленою» хімією та технологіями обговорюються та плануються на найвищих рівнях, а стратегії по їх впровадженню носять характер державних та міжнародних політик, нажалі в реальному житті та на виробництвах ми бачимо дуже небагато прикладів реалізації цих напрямків в синергії. Тому обговорення конкретних прикладів та ідей синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики є вкрай важливими, як для сталого розвитку економіки України так і глобального руху в цьому напрямку.

Мета роботи

Метою цієї статті є розгляд основних принципів, напрямків та прикладів синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості, а також висвітлення переваг, викликів та перспектив такої синергії. Стаття складається з трьох змістовних розділів: перший розділ присвячено зеленій хімії, другий розділ – зеленій енергетиці, а третій розділ – розглянуто приклад синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості. У кінці статті наведено висновки та рекомендації щодо подальшого розвитку та впровадження синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості.

Виклад основного матеріалу та аналіз отриманих результатів

У роботі досліджено один з варіантів синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики на прикладі одночасного рішення проблеми засмічення охолоджуючого ставка електростанції водоростями і використанням цих водоростей, як альтернативної, економічно вигідної сировини для виробництва біологічно-активних добавок та барвників. Перед оглядом запропонованого синергічного рішення зупинимося на огляді принципів зеленої хімії та

зеленої енергетики.

Зелена хімія та її принципи.

Зелена хімія, або екологічна хімія, є науковим підходом, який має на меті створювати хімічні продукти і процеси, які мінімізують використання та утворення небезпечних речовин. Вона базується на принципі охорони навколишнього середовища та здоров'я людини, акцентуючи на розробці інноваційних методів, які зменшують або виключають використання та виробництво шкідливих матеріалів, речовин та продуктів. Зелена хімія прагне досягти ефективності та стійкості протягом усього життєвого циклу хімічних продуктів, враховуючи їхній вплив на економіку, суспільство та екосистеми.

Зелена хімія з'явилася у 1990-х роках як відповідь на зростаючу свідомість про негативні наслідки хімічної промисловості для довкілля та здоров'я людей. Одним із засновників цієї галузі є американський хімік Пол Анастас, який ініціював Програму досліджень запобіганню забруднення шляхом використанням альтернативних технологій під егідою Агентства з охорони навколишнього середовища США. У 1998 році він разом з Джоном Ворнером висунув 12 принципів зеленої хімії [6, 7], які стали основою для розробки та впровадження стійких хімічних продуктів і процесів.

12 принципів зеленої хімії є наступними:

1. запобігайте відходам, де це тільки можливо;
2. сприяти розвитку «атомної економії», що означає максимізувати включення всіх матеріалів, які використовуються в процесі, у кінцевий продукт;
3. синтезуйте менш небезпечні хімічні речовини;
4. розробляйте більш безпечні, не шкідливі речовини;
5. в хімічних процесах використовуйте безпечні розчинники та допоміжні речовини;
6. розробляйте енергозберігаючі хіміко-технологічні процеси;
7. використовуйте поновлювальні джерела сировини та енергії;
8. уникайте та/або зменшуйте отримання побічних речовин;
9. використовуйте каталізатори;
10. розробляти продукти, які мають мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище під час використання та утилізації;
11. розробляти та впроваджувати автоматизовані методи аналізу та контролю із метою мінімізації утворення побічних, незапланованих продуктів;
12. розробляти та впроваджувати безпечніші форми хімічних речовин, технологій та процесів для запобігання нещасних випадків та нанесення шкоди здоров'ю людини.

Ці принципи сприяють розвитку зеленої хімії як нового напрямку в науці, який відкриває нові можливості для інновацій та покращення якості життя. Зелена хімія застосовується у різних галузях

промисловості, таких як фармацевтика, сільське господарство, матеріалознавство, енергетика, косметика та інші. Зелена хімія також сприяє реалізації Цілей сталого розвитку ООН, які передбачають забезпечення екологічної, соціальної та економічної стійкості для всіх людей. Зелена хімія є не тільки науковою дисципліною, але й філософією, яка спонукає хіміків та інженерів до відповідального та етичного ставлення до хімії та її впливу на світ.

Зелена енергетика та її принципи.

Зелена енергетика – це концепція, яка спрямована на використання відновлюваних джерел енергії з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Принципи зеленої енергетики включають в себе:

1. Відновлювані джерела енергії: використання енергії, яка постійно відновлюється в природі, такі як сонячна, вітрова, гідроелектроенергія, біомаса та геотермальна енергія.

2. Ефективність: зелена енергетика сприяє підвищенню енергоефективності, зменшенню витрат та оптимізації процесів виробництва енергії.

3. Мінімальний вплив на навколишнє середовище: зелена енергетика прагне зменшити негативний вплив на природу, зменшуючи викиди парникових газів, водних та повітряних забруднень.

4. Інновації та розвиток технологій: розвиток новітніх технологій і постійна інноваційна діяльність в галузі зеленої енергетики дозволяють забезпечувати більш ефективно та стійке виробництво енергії.

5. Енергетична безпека: зелена енергетика сприяє зменшенню залежності від традиційних джерел енергії та забезпечує більшу енергетичну безпеку.

6. Сприяння сталому розвитку: зелена енергетика допомагає забезпечити потреби сучасного суспільства, не завдаючи шкоди природі та зберігаючи ресурси для майбутніх поколінь.

7. Глобальна співпраця: співпраця між країнами та міжнародні ініціативи грають ключову роль у розвитку зеленої енергетики, оскільки проблеми зміни клімату та енергетичної безпеки потребують глобальних рішень.

8. Залучення громадськості: інформування та залучення громадськості є важливим аспектом, оскільки підтримка населення є ключовою для успіху переходу до зеленої енергетики.

Ці принципи спрямовані на створення сталого та екологічно чистого енергетичного майбутнього, а також як ключовий елемент впровадження концепції розподіленої генерації [8].

Принципи та підходи зеленої хімії та зеленої енергетики сильно переплітаються між собою, що дозволяє розглядати їх синергії та доповнення одна одної для сталого розвитку людства. Синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики на прикладі одночасного рішення проблеми засмічення охолоджуючого ставка електростанції водоростями і використанням цих водоростей, як альтернативної,

економічно вигідної сировини для виробництва біологічно-активних добавок та барвників.

Заростання охолоджуючого ставка електростанції водоростями може призвести до зниження ефективності енергогенерації, оскільки водорості поглинають тепло, зменшують пропускну здатність труб та утворюють біологічні відкладення на поверхнях теплообмінників. За деякими оцінками, заростання водоростями може зменшити ефективність енергогенерації. Заростання охолоджуючого ставка електростанції водоростями також може мати негативний вплив на екологію, оскільки водорості сприяють евтрофікації водойми, збільшують ризик розвитку токсичних цвітінь та зменшують біорізноманіття. Для запобігання та контролю заростання охолоджуючого ставка електростанції водоростями можна використовувати різні методи, такі як механічне очищення, хімічна обробка, біологічна боротьба, ультразвукова обробка та інші.

Однією з розповсюджених рослин водоростей, що спричиняють таку проблему є Рдест (пістія) – це тропічна водна рослина, яка може стати інвазивною та заростати водойми в помірних та субтропічних регіонах. Рдест може пригнічувати ріст інших водних рослин, зменшувати кількість кисню в воді, перешкоджати навігації, рибальству та водопостачанню, а також створювати умови для розвитку комах-векторів хвороб [9]. Проблема заростання водойм США рдестом стала актуальною в 70-х роках минулого століття, коли рдест поширився по південним штатам, таким як Флорида, Техас, Луїзіана, Алабама, Джорджія та інші [10]. Зараз рдест вважається однією з найбільш шкідливих водних рослин у США, яка потребує ефективних методів контролю та ліквідації. Для боротьби з поширенням рдесту в США використовуються різні методи, такі як: механічне видалення рдесту за допомогою спеціальних машин, що збирають і вивозять рослини з водойми; хімічна обробка води гербіцидами, що знищують рдест, але можуть мати небажані побічні ефекти для інших організмів; біологічна боротьба з використанням природних ворогів рдесту, таких як риби, молоски, комахи та інші рослини, що конкурують з рдестом за ресурси; ультразвукова обробка води, що впливає на фотосинтез та ріст рдесту, а також на його розмноження.

Більшість із зазначених методів боротьби з цією проблемою зосереджені на знищенні водорості. Якщо ж дивитись на цю ситуацію через призму питання ресурсозбереження та використання відновлювальних ресурсів, то можна зробити висновки, що вищевикладені методи їм не відповідають. Підтвердженням цього твердження можуть слугувати дослідження, що відбуваються в Світі, серед інших можна виділити наведені наукові роботи [11, 12, 13].

Рішенням проблеми повинно бути не знищення, а використання водорості, як біологічної сировини для виробництва. Рдест (рис. 1), як біологічна сировина для виробництва цікавий і цінний

тому, що на даний момент корисно не використовується. Зважаючи на наявність великої кількості незатребуваної сировини нами було поставлено завдання розробити проект з переробки водоростей рдест і отриманням з нього продуктів: біологічно активної добавки, що містить хлорофіл (БАД «Chlorophyll») та харчового барвника E140.



Рис. 1 – Заростання річок рдестом

Хлорофіл можна розглядати як похідні протопорфірину - порфірину з двома карбоксильними заступниками, вільними або етерифікованими (рис. 2).

У вищих рослинах міститься дві форми хлорофілу - хлорофіл А і хлорофіл Б. При загальному вмісті хлорофілів 0,7-1,1 г на 1 кг зеленої маси рослин співвідношення хлорофілів А і Б зазвичай становить 3:1 (залежно від освітленості, наявності добрива і інших факторів може коливатися від 2:1 до 3,4:1, що використовується для контролю над розвитком рослин).

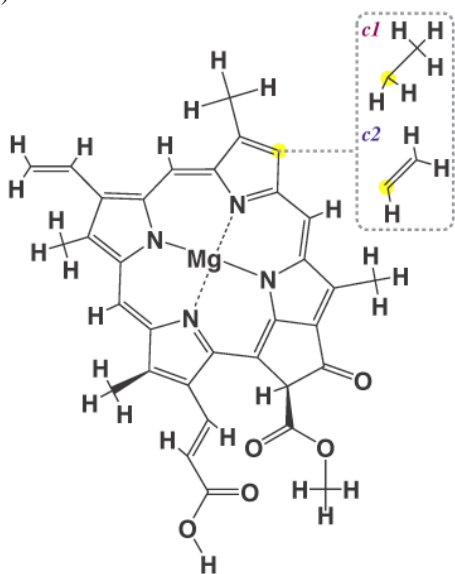


Рис. 2 – Формула хлорофілу

Завдяки своїм спектральним властивостям та природньому походженню речовина хлорофіл широко застосовується, як натуральний барвник, в тому числі він має власний шифр харчової добавки – E140. Хлорофіл А поглинає світло у фіолетовій, блакитній та червоній частинах спектру, відбиваючи в основному зелений колір, що і надає йому характерного забарвлення. Хлорофіл Б – жовтого кольору і поглинає світло переважно у синій частині спектру.

На сьогоднішній день відомо кілька способів промислового виділення хлорофілу із рослинної сировини. Найбільш поширеною сировиною для промислового отримання є люцерна (багаторічна бобова рослина), рідше – конюшина та петрушка. Недоліком відомих способів отримання хлорофілу є використання якості екстрагенту етилового спирту, який не забезпечує максимального виділення хлорофілу з прісноводної трави. Також з часом хлорофіл в етанолі утворює аломерні форми, які не є стійкими в процесі зберігання. У нашому проекті для отримання хлорофілу використовується альтернативний вид економічно вигідної сировини – водорості, які не вимагають посіву та догляду. Найважливішими перевагами даного виду сировини є те, що рдест поширений на всіх континентах крім Антарктиди, має високу швидкість росту і хорошу зимостійкість. Слід укласти, що збирання та заготівля водорості допомагають покращити екосистему водойм, а також розширити сировинну базу регіону шляхом комплексної переробки сировини у виробництві БАД та барвника.

Основним цільовим продуктом переробки водоростей є БАД «Chlorophyll», який являє собою желатинові капсули, наповнені хлорофілом і подрібненим порошком водоростей. Цей БАД має деякі важливі фармакологічні властивості:

- допомагає підвищити гемоглобін у крові;
- посилює імунну функцію організму;
- має протизапальну та антибактеріальну дію;
- запобігає росту бактерій у ранах;
- очищає кров, виводить токсини;
- підтримує здорову кишкову флору і т.д.

Слід зазначити, що продукти на основі хлорофілу популярні у світі. Аналогічний БАД випускається у деяких країнах (рис. 3). Наприклад, у США його випускають кілька великих компаній (Paradigma, NSP). У нашій країні виробництво цього продукту відсутня.

Так як в Україні виробництво подібних продуктів відсутнє, але користується популярністю в Світі, можна зробити висновок, що пропонований продукт БАД «Chlorophyll» затребуваний на ринку. Також паралельно з основним продуктом планується випуск барвників. Актуальність барвника полягає в тому, що він досить часто використовується в харчовій промисловості та відомий як добавка E140. В Україні він також не випускається, а імпортується з Німеччини та Китаю. Виходячи з чого можна зробити висновок, що виробництво барвника в нашому регіоні так само буде затребуваним.



Рис. 3 – БАД на основі хлорофілу в товарній формі

Технологія виділення хлорофілу, а також отримання цільових продуктів включає наступні основні стадії: заготівля водорості (сушіння, подрібнення), екстракція сумішшю гексану та етанолу, відгін розчинника та сушіння. Слід зазначити, що разом із хлорофілом у незначній мірі екстрагуються каротиноїди, що підвищує цінність нашого продукту, як БАД. Отриманий сухий порошок перемелюють та капсулюють.

Стадія заготівлі сировини відбувається у літній період – з початку червня до кінця серпня. Збирають водорість у гирлах річок, вводиомах, а також пропонується збирати в охолодних придах електростанцій. Далі її подрібнюють, сушать, відправляють на зберігання для подальшої екстракції.

Із жмиху, що залишиться після процесу екстракції запропановано виготовлення паливних пелет.

Структурна схема виробництва хлорофілу зображено на рисунку 4.

На основі блок-схеми була розроблена принципова технологічна схема виробництва хлорофілу та сировини для паливних пелет [14].

Запропонована технологія задовольняє одразу декільком принципам зеленої хімії. Серед них: третій, четвертий, п'ятий, восьмий та десятий принципи зеленої хімії.

Ключовою (лімітуючою) складовою формування собівартості запропонованих продуктів є вартість тепла необхідного для процесів екстракції, сушки та упарювання. У зв'язку з цим, виходячи з потреби мінімізації цих видатків пропонується використання тепла, яке віддається електростанцією, для підігріву води, повітря або пари, які використовуються для технологічних, промислових або побутових потреб. Тобто поєднати виробничі потреби з процесами направленними на зменшення теплових втрат електростанцій за рахунок використання рекуперації та ефективного відведення тепла (це спосіб підвищення енергоефективності та

зниження викидів парникових газів) [15]. Рекуперація – це процес, який полягає у використанні тепла, яке віддається електростанцією, для підігріву інших процесів або об'єктів. Ефективне відведення тепла – це процес, який полягає у зменшенні теплових втрат від електростанції до навколишнього середовища. Такий підхід повністю задовольняє шостому принципу зеленої хімії щодо запровадження енергозберігаючих технологій на виробництвах.



Рис. 4 – Структурна блок-схема виробництва хлорофілу та паливних пелет

Із метою відповідності першому та сьомому принципам зеленої хімії по мінімізації кількості відходів та використанню відновлювальних ресурсів пропонується створення паливних пелет зі жмиху після екстракції. Такий підхід має ряд декілька переваг, таких як наприклад:

- зниження витрат на утилізацію жмиху, який може бути шкідливим для навколишнього середовища, якщо не використовується;

- зменшення залежності від інших видів палива, таких як газ, нафта, вугілля або деревина;

- зменшення викидів парникових газів, оскільки пелети зі жмиху мають низький вміст вуглецю та використовують відновлювану біомасу.

Створення паливних пелет зі жмиху після екстракції – це процес, який полягає у перетворенні жмиху на паливні гранули, які можуть бути використані для опалення. Цей процес включає в себе такі стадії: сушіння жмиху до вологості 10-15%; розмелювання жмиху до однорідної фракції; гранулювання жмиху за допомогою преса-гранулятора, який стискає жмих під високим тиском та температурою, формуючи гранули; охолодження та упаковка пелет для зберігання та транспортування.

Таким чином, у результаті нашої роботи:

- запропоновано комплексне рішення щодо покращення екосистеми та ефективності роботи охолоджувального водоймища електростанції;

- запропоновано варіант організації ефективного маловідходного виробництва, що відповідає одночасно восьми з дванадцяти принципам зеленої хімії в синергії з принципами зеленої енергетики;

- розширено сировинну базу для виробництва БАД, харчового барвника та паливних пелет.

Висновки

У статті на прикладі запропонованого виробництва досліджено основні принципи, напрямки та приклади синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості, а також оцінено переваги, виклики та перспективи такої синергії. Доведено, що синергетичний підхід до зеленої хімії та енергетики є ефективним, тому що він дозволяє досягати більшої економії ресурсів, зменшення викидів та відходів, покращення якості продуктів та збільшення конкурентоспроможності. Такий підхід також сприяє створенню інноваційних рішень, які враховують потреби сталого розвитку та кругової економіки.

Встановлено, що синергія підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості потребує подальших досліджень та розвитку, щоб вирішити деякі проблеми та виклики, такі як:

- недостатня нормативно-правова база, фінансова підтримка та стимулювання зелених ініціатив в Україні;

- низька інформованість та зацікавленість громадськості, споживачів та промисловців у зеленій хімії та енергетиці;

- обмежена доступність та якість відновлювальної сировини та енергоресурсів для зелених технологій та виробництв;

- недостатня наукова база, кадровий потенціал

та інфраструктура для проведення досліджень та впровадження синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості.

Таким чином, закликаємо до активізації наукової, освітньої, державної та громадської діяльності, спрямованої на підтримку та розвиток синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики в промисловості як одного з ключових факторів сталого розвитку України.

Список літератури

1. Презентовано проєкт Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Кабінет Міністрів України (kmu.gov.ua). URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/prezentovano-proekt-konceptsiyi-zelenogo-energetichnogo-perehodu-ukrayini-do-2050-roku> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
2. Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року / Держенергоефективності України (saec.gov.ua). URL: <https://saec.gov.ua/uk/content/npdee-2030> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
3. Огляд Стратегії енергетичної безпеки України від ЄУЕА – EUEA - European-Ukrainian Energy agency (euea-energyagency.org). URL: <https://euea-energyagency.org/uk/novyny-ta-podiyi/novyny-rynku/oglyad-strategiyi-energetychnoyi-bezpeky-ukrayiny-vid-yeuea/> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
4. Цілі сталого розвитку UNDP. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
5. How Just Transition can help deliver the Paris Agreement / Climate Promise (undp.org). URL: <https://climatepromise.undp.org/research-and-reports/how-just-transition-can-help-deliver-paris-agreement> (дата звернення: 02.02.2024 р.).
6. Anastas P. T., Warner J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press. By permission of Oxford University Press. New York, 1998. P. 30.
7. Тихомірова Ф. А. Зелена хімія: нова хімічна філософія. *Вісник ОНУ. Хімія*. 2015. Т. 20, вип. 2 (54). С. 93–98. doi:10.18524/2304-0947.2015.2(54).50636.
8. Данильченко Д. О., Федорчук С. О., Потривай А. Е., Петров С. О., Мінакова К. О. Зелена енергетика як ключовий елемент впровадження концепції розподіленої генерації. *Електротехніка та електроенергетика*. 2023. № 4. С. 17–28. doi: 10.15588/1607-6761-2023-4-2.
9. Якубенко Б. Є., Царенко П. М., Алейніков І. М., Шабарова С. І., Машковська С. П., Дядюша Л. М., Тертишний А. П. *Ботаніка з основами гідроботаніки (водні рослини України): підручник для студентів класичних та аграрних університетів*. Київ: Фітосоціоцентр, 2011. 535 с.
10. Терешко О. А., Жердецький Д. І., Коржов Є. І. Загальні аспекти впливу надлишкового розвитку гідрофітоценозів на екосистему водойми. Сучасний стан водних біоресурсів та аквакультури України і Світу. *Матеріали наук.-практ. конф. молодих вчених з міжнародною участю; зб. наук. праць (Херсон, 31 жовт. 2023 р.)*. Херсон. ХДАЕУ, 2023. 152 с.
11. Francavilla M., Intini S., Monteleone M. Designing an Integrated Technological Platform Centered on

- Microalgae to Recover Organic Waste and Obtain Multiple Bioproducts. *Papers of the 24th European Biomass Conference: Setting the Course for a Biobased Economy*. 2016. P. 294–299.
12. Lozano P., García-Verdugo E. From green to circular chemistry paved by biocatalysis. *Green Chemistry*. 2023. P. 7041–7057.
 13. Song B., Lin R. C., Lam C. H., Wu H., Tsui T. H., Yu Y. Recent advances and challenges of inter-disciplinary biomass valorization by integrating hydrothermal and biological techniques. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2021. doi: 10.1016/j.rser.2020.110370.
 14. Папакіна О. О., Петров С. О., Кричківська Л. В. Розробка технології отримання хлорофілу і продуктів на його основі. Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 44(1153). С. 56–60.
 15. Соловей О. І., Розен В. П., Плешков П. Г. та ін. *Основи ефективного використання електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств: навч. посіб.* Кіровоград. КНТУ, 2015. 287 с.
 7. Tykhomirova F. A. Zelena khimiya: nova khimichna filosofiya [Green Chemistry: A New Chemical Philosophy]. *Bulletin ONU. Khimiya*, 2015, Vol. 20, Iss. 2 (54), pp. 93–98, doi:10.18524/2304-0947.2015.2(54).50636.
 8. Danylchenko D. O., Fedorchuk S. O., Potryvay A. E., Petrov S. O., Minakova K. O. Zelena enerhetyka yak klyuchovyy element vprovadzheniya kontseptsii rozpodilenoї heneratsii [Green Energy as a Key Element in Implementing the Concept of Distributed Generation]. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2023, no. 4, pp. 17–28, doi: 10.15588/1607-6761-2023-4-2.
 9. Yakubenko B. Y., Tsarenko P. M., Aleynikov I. M., Shabarova S. I., Mashkovska S. P., Dyadyusha L. M., Tertyshnyy A. P. *Botanika z osnovamy hidrobotaniky (vodni roslyny Ukrainy): pidruchnyk dlya studentiv klasychnykh ta ahrarnykh universytetiv. [Botany with Basics of Hydrobotany (Aquatic Plants of Ukraine): Textbook for Students of Classical and Agricultural Universities]*. Kyiv. Fitosotsiotsentr, 2011. 535 p.
 10. Tereshko O. A., Zherdetsky D. I., Korzhov Ye. I. Zahal'ni aspekty vplyvu nadlyshkovoho rozvytku hidrofytosenoziv na ekosystemu vodoymy [Botany with Basics of Hydrobotany (Aquatic Plants of Ukraine): Textbook for Students of Classical and Agricultural Universities]. Suchasnyy stan vodnykh bioresursiv ta akvakul'tury Ukrainy i Svit. *Materialy nauk.-prakt. konf. molodykh vchenykh z mizhnarodnoyu uchastyu; zb. nauk. prats [Current State of Water Bioresources and Aquaculture in Ukraine and the World: Proceedings of the Sci.-Practical Conf. of Young Scientists with International Participation; Collected Works]*. Kherson. KHDAEU, 2023. 152 p.

References (transliterated)

1. Prezentovano proekt Kontseptsii «zelenoho» enerhetychnoho perekhodu Ukrainy do 2050 roku. Kabinet Ministriv Ukrainy (kmu.gov.ua) [Presentation of the Concept of Ukraine's "Green" Energy Transition by 2050. Cabinet of Ministers of Ukraine (kmu.gov.ua)]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/prezentovano-proekt-koncepcii-zelenogo-energetichnogo-perehodu-ukrayini-do-2050-roku> (accessed 02.02.2024).
2. Natsional'nyy plan diy z enerhoefektyvnosti na period do 2030 roku Derzhenerhoefektyvnosti Ukrainy (sae.gov.ua). [National Action Plan on Energy Efficiency for the Period up to 2030. State Agency on Energy Efficiency of Ukraine (sae.gov.ua)]. Available at: <https://sae.gov.ua/uk/content/npdee-2030> (accessed 02.02.2024).
3. Ohlyad Stratehiyi enerhetychnoyi bezpeky Ukrainy vid YEUEA – EUEA – European-Ukrainian Energy agency (euea-energyagency.org) [Overview of the Energy Security Strategy of Ukraine from EUEA – European-Ukrainian Energy Agency (euea-energyagency.org)]. Available at: <https://euea-energyagency.org/uk/novyny-ta-podiyi/novyny-rynku/oglyad-strategiyi-energetychnoyi-bezpeky-ukrayiny-vid-yeuea/> (accessed 02.02.2024).
4. Tsili staloho rozvytku UNDP [UNDP Sustainable Development Goals]. Available at: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku> (accessed 02.02.2024).
5. How Just Transition can help deliver the Paris Agreement. Climate Promise (undp.org). Available at: <https://climatepromise.undp.org/research-and-reports/how-just-transition-can-help-deliver-paris-agreement> (accessed 02.02.2024).
6. Anastas P. T., Warner J. C. *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press. By permission of Oxford University Press. New York, 1998, p. 30.
11. Francavilla M., Intini S., Monteleone M. Designing an Integrated Technological Platform Centered on Microalgae to Recover Organic Waste and Obtain Multiple Bioproducts. *Papers of the 24th European Biomass Conference: Setting the Course for a Biobased Economy*, 2016, pp. 294–299.
12. Lozano P., García-Verdugo E. From green to circular chemistry paved by biocatalysis. *Green Chemistry*, 2023, pp. 7041–7057.
13. Song B., Lin R. C., Lam C. H., Wu H., Tsui T. H., Yu Y. Recent advances and challenges of inter-disciplinary biomass valorization by integrating hydrothermal and biological techniques. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110370.
14. Papakina O. O., Petrov S. O., Krychivska L. V. Rozrobka tekhnolohiyi otrymannya khlorofilu i produktiv na yoho osnovi. Innovatsiyni doslidzhennya u naukovykh robotakh studentiv [Development of Chlorophyll Extraction Technology and Products Based on It. Innovative Research in Student Scientific Papers]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 2015, no. 44 (1153), pp. 56–60.
15. Solovey O. I., Rozen V. P., Plyeshkov P. H. ta in. *Osnovy efektyvnoho vykorystannya elektrychnoyi enerhiyi v systemakh elektrospozhyvannya promyslovykh pidpryyemstv: navch. posib. [Fundamentals of efficient electricity usage in industrial enterprise electrical consumption systems: a Study Guide]*. Kirovohrad. KNTU, 2015. 287 p.

Відомості про авторів (About authors)

Петров Сергій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6500-5310; e-mail: serhii.petrov@khpi.edu.ua.

Petrov Serhii – Ph.D, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6500-5310; e-mail: serhii.petrov@khpi.edu.ua.

Данильченко Дмитро Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри передачі електричної енергії; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7912-1849; e-mail: dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua.

Danylchenko Dmytro – Ph.D, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Electrical Power Transmission Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7912-1849; e-mail: Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua.

Куценко Сергій Анатолійович – доктор фармацевтичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0005-7194-0707; e-mail: serhii.kutsenko@khpi.edu.ua.

Kutsenko Serhii – Doctor of science, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0005-7194-0707; e-mail: serhii.kutsenko@khpi.edu.ua.

Фалалєєва Тетяна Василівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри органічного синтезу та фармацевтичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0021-4917; e-mail: falaleevatatana7@gmail.com.

Falalieieva Tetiana – Ph.D, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Organic Synthesis and Pharmaceutical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0021-4917; e-mail: falaleevatatana7@gmail.com.

Петрова Юлія Володимирівна – Ph.D, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри ливарного виробництва; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8184-906X; e-mail: yuliia.petrova@khpi.edu.ua.

Petrova Yuliia – Ph.D, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer of the Foundry Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8184-906X; e-mail: yuliia.petrova@khpi.edu.ua.

Мінакова Ксенія Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua.

Minakova Kseniia – Ph.D, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of Physics Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: kseniia.minakova@khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Петров С. О., Данильченко Д. О., Куценко С. А., Фалалєєва Т. В., Петрова Ю. В., Мінакова К. О. Приклад синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 11-19. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.02.

Please cite this article as:

Petrov S., Danylchenko D., Kutsenko S., Falalieieva T., Petrova Y., Minakova K. An example of the synergy of the approaches of green chemistry and green energy. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 11–19, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.02.

*Надійшла (received) 20.01.2024
Прийнята (accepted) 12.03.2024*

УДК 004.42

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.03

РОЗРОБКА ДЕСКТОПНОГО ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ E-MAIL МАРКЕТИНГУ**О. М. МАРУСЕНКО, В. О. МЕТЕЛЬОВ*, В. В. ОВСЯНИКОВ, А. С. РИЖЕНКО**

кафедра комп'ютерного моделювання процесів та систем, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: volodymyr.mietielov@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ У контексті інтернет-реклами, прямий маркетинг включає в себе кілька ефективних засобів, якими активно користуються професіонали. До цих засобів відносяться: маркетинг через електронні листи, маркетинг за допомогою мобільних пристроїв, надсилання push-сповіщень та маркетинг через месенджери. E-mail маркетинг служить ключовим засобом безпосередньої взаємодії, пропонуючи метод двостороннього спілкування з метою розвитку відносин із клієнтом або збільшення обсягів продажу. Ця комунікація здійснюється за допомогою відправки електронних листів, що містять інформацію, актуальну та цікаву для клієнта. Розглядається розробка десктопного застосунку для e-mail маркетингу. Особлива увага у роботі приділена автоматизації процесу розсилки, що забезпечує доставку повідомлень до кінцевих отримувачів без затримок і помилок. Проведено аналіз існуючих рішень на ринку, визначено ключові вимоги до функціональності та інтерфейсу додатку. Розроблений застосунок демонструє високу ефективність у роботі з різними групами користувачів, забезпечуючи гнучкість налаштувань, простоту використання та високий рівень безпеки комунікації. Програма дозволяє користувачу завантажувати файл зі списком електронних адрес і додатковою інформацією (наприклад, ПІБ адресатів). Розроблений застосунок надає можливість персоналізації листів при використанні шаблонів листів та обрати сервіс для відправки листів, такий як Google (Gmail) або Microsoft (Outlook). Особлива увага приділена розробці алгоритмів, які дозволяють оптимізувати процес відправлення листів, зокрема, розумне розподілення листів. Процес розробки включає в себе етапи проєктування, написання коду, інтеграції з існуючими поштовими серверами та наступного тестування програми. Програма, розроблена на основі платформи .NET 7 та мови програмування C#, використовує WinForms для створення графічного користувацького інтерфейсу. Цей застосунок для операційної системи Windows, який поєднує в собі сучасні можливості .NET 7 із зручністю та інтуїтивністю графічних інтерфейсів на основі WinForms. Проведено тестування застосунку та аналіз його конкурентоспроможності на ринку програмного забезпечення. Тестування програмного продукту включає як автоматизовані, так і ручні методи, щоб забезпечити його надійність і відповідність вимогам безпеки. Висока надійність доставки повідомлень та адаптивність до різних сценаріїв використання визначають значущість розробленого продукту в сучасному цифровому світі, вносячи вагомий вклад у розвиток технологій цифрової комунікації. Створено ефективний, безпечний та легкий у використанні застосунок, що дозволяє користувачам ефективно управляти e-mail маркетингом, підвищуючи якість комунікації та взаємодії з аудиторією.

Ключові слова: десктопний застосунок; .Net 7; WinForms; e-mail маркетинг; цифровий маркетинг; прямий маркетинг; алгоритми цифрової комунікації.

DEVELOPMENT OF A DESKTOP APPLICATION FOR E-MAIL MARKETING**O. MARUSENKO, V. MIETIELOV, V. OVSIANIKOV, A. RYZHENKO**

Department of Computer Modeling of Processes and Systems, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In the context of internet advertising, direct marketing includes several effective tools actively used by professionals. These tools include email marketing, mobile marketing, push notification delivery, and messenger marketing. Email marketing serves as a key tool for direct interaction, offering a method of two-way communication with the aim of building relationships with the client or increasing sales volumes. This communication is facilitated through the sending of emails containing information that is relevant and interesting to the client. The development of a desktop application for email marketing was considered. Special attention in the work is given to automating the mailing process, ensuring messages are delivered to the end recipients without delays or errors. An analysis of existing solutions in the market has been conducted, identifying key requirements for the application's functionality and interface. The developed application demonstrates high efficiency in working with different user groups, providing flexibility in settings, ease of use, and a high level of security for communications. The program allows the user to upload a file with a list of email addresses and additional information (for example, the recipients' full names). The developed application offers the ability to personalize emails using templates and choose a service for sending letters, such as Google (Gmail) or Microsoft (Outlook). Particular attention has been paid to developing algorithms that optimize the email sending process, including smart distribution of emails. The development process includes stages of design, coding, integration with existing mail servers, and subsequent testing of the program. The program, developed based on the .NET 7 platform and the C# programming language, uses WinForms to create a graphical user interface. This Windows operating system application combines the modern capabilities of .NET 7 with the convenience and intuitiveness of graphic interfaces based on WinForms. Testing of the application and analysis of its competitiveness in the software market has been conducted. Testing of the software product includes both automated and manual methods to ensure its reliability and compliance with security requirements. The high reliability of message delivery and adaptability to different usage scenarios underscore the significance of the developed product in the modern digital

world, making a substantial contribution to the development of digital communication technologies. An efficient, secure, and user-friendly application has been created, allowing users to effectively manage email marketing, enhancing the quality of communication and interaction with the audience.

Keywords: *desktop application; .NET 7; WinForms; email marketing; digital marketing; direct marketing; digital communication algorithms.*

Вступ

З огляду на розвиток інтернет маркетингу та маркетингових стратегій в світі, за останні роки спостерігається значне збільшення зацікавленості у використанні e-mail маркетингу як ефективного засобу приваблення потенційних клієнтів на сайт компанії, що, у свою чергу, сприяє популяризації бізнесу в інтернеті [1,2]. Це сприяє не лише підвищенню видимості бізнесу в інтернеті, але й ефективному просуванню товарів та послуг.

На протигагу спаму, який часто вважається небажаним, дана стратегія є законною та ефективною. Користувачі самостійно надають свою електронну адресу на сайті, щоб отримувати важливу інформацію про послуги або майбутні події компанії. Повідомлення або листи, які приходять за умови здійснення користувачем певних дій, можуть містити корисну інформацію про актуальні пропозиції та події [3,4].

E-mail маркетинг не лише дозволяє підтримувати зв'язок із існуючими клієнтами та спонукати їх до повторних покупок, але й ефективно супроводжує клієнта на кожному етапі взаємодії з брендом [5,6]. Незважаючи на те, що цей метод є одним із найдавніших у сфері інтернет маркетингу, він залишається одним із найбільш доступних та ефективних способів просування онлайн.

Розроблений в роботі застосунок є результатом вивчення існуючих інструментів e-mail маркетингу у сучасному світі цифрових комунікацій.

Мета роботи

Мета роботи – створити зручний і ефективний інструмент для e-mail маркетингу, з можливістю персоналізації змісту та вибору вихідного поштового сервісу.

Розробка алгоритмів, спрямованих на оптимізацію процесу розсилки електронних листів, займає важливе місце у сфері цифрового маркетингу [7,8]. Ці алгоритми покликані забезпечити інтелектуальне розподілення листів, що забезпечує доставку повідомлень до кінцевих отримувачів без затримок і помилок. Розробка таких систем охоплює кілька ключових етапів: проектування, програмування, інтеграція з наявними поштовими платформами та тестування. Під час тестування використовуються як автоматизовані, так і ручні методики для забезпечення високої якості, безпеки та відповідності програмного продукту сучасним стандартам.

Опис роботи додатку

Програма, розроблена на основі платформи .NET 7 [9] та мови програмування С#, використовує WinForms для створення графічного користувацького інтерфейсу. Застосунок розроблений для операційної системи Windows.

Код програми зберігається в репозиторії на GitHub [10], що забезпечує прозорість розробки, можливість відслідковувати зміни та співпрацювати над вдосконаленням коду. Завдяки цьому користувачі та інші розробники можуть ознайомитися з кодом, внести свої пропозиції чи знайти потенційні покращення.

Для розробки застосунку було обрано MVP (Model-View-Presenter) шаблон проектування [11-14].

MVP є шаблоном проектування, який дозволяє відокремити бізнес-логіку від графічного інтерфейсу користувача. Він використовує трикомпонентну структуру, що складається з Моделі (Model), Представлення (View) та Презентера (Presenter). Модель представляє дані і бізнес-логіку, Представлення відповідає за графічний інтерфейс, а Презентер обробляє взаємодію між Моделлю та Представленням.

Програма розроблена так, щоб забезпечити користувачу комфортне та ефективне використання інструментів електронної пошти. Основні елементи програми включають:

- Модуль завантаження списку одержувачів, який дозволяє користувачам імпортувати адреси одержувачів;
- Функціонал для додавання вкладень до листа, здатний підтримувати різноманітні формати файлів;
- Вікно налаштувань, де користувачі можуть ввести свій логін і пароль для подальшої авторизації та відправки листів;
- Інтерфейс для створення вмісту листа, де користувач може вказати тему листа та його основний текст;
- Система валідації, яка перевіряє наявність необхідних елементів перед відправленням: переконується, що список одержувачів не порожній і введено тема та текст листа.

На рис. 1 представлено головне робоче вікно програми для розсилки електронних листів, яке користувач бачить відразу після запуску додатка. Це вікно створено з метою надання користувачеві максимального комфорту та функціональності під час роботи з електронною поштою. Основний акцент зроблено на списку отримувачів: він включає не лише електронні адреси, але й повні дані кожного отримувача – прізвище, ім'я та по батькові (ПІБ). Така деталізація дозволяє здійснювати відправлення

листів, в яких текст автоматично адаптується під конкретного отримувача, що забезпечує особистий підхід і підвищує шанси на успішне сприйняття листа.

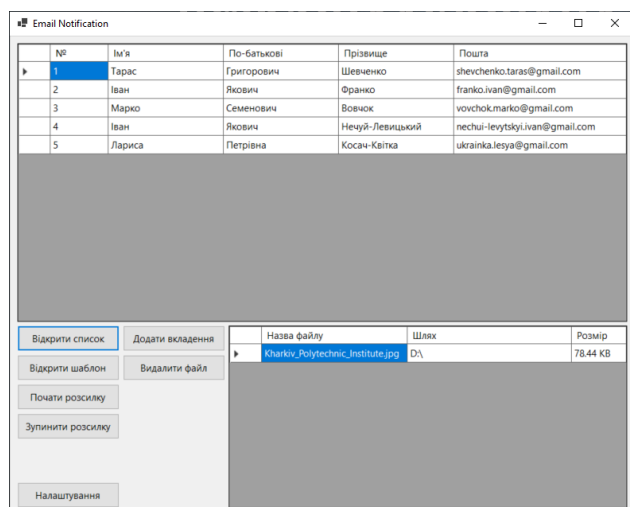


Рис. 1 – Головне робоче вікно програми

Важливим аспектом є можливість роботи з вкладеннями: користувач може додавати файли до свого листа або, при необхідності, видалити їх. Ця функція особливо корисна, коли потрібно надіслати додаткові матеріали або документи. Програма підтримує відправку таких форматів даних, як jpeg, jpg та pdf.

Крім основних функцій, у вікні є додаткові інструменти для управління процесом розсилки. Кнопки «Почати розсилку» та «Зупинка розсилки» дозволяють контролювати процес відправлення повідомлень, а прогрес-бар візуалізує стадію виконання цього процесу. Щоб забезпечити стабільність роботи програми та уникнути випадкових дій під час розсилки, деякі елементи управління тимчасово стають неактивними, що допомагає зосередитися на головному завданні.

Нарешті, користувачу надається доступ до налаштувань програми через кнопку «Налаштування». Тут можна змінювати різні параметри роботи додатка, адаптуючи його під особисті потреби та вимоги.

На рис. 2 наведено приклад вигляду вікна шаблону. Щоб забезпечити максимальну персоналізацію електронних листів, у вікні шаблону є можливість вказувати шаблон. Наприклад, користувач може використовувати шаблон листа, де є поле для ПІБ (яке береться з файлу), та замінювати цей ПІБ для кожного отримувача на відповідне значення. Це дає можливість користувачам ефективно використовувати персоналізовані шаблони для розсилки листів. Користувач може вказати від одного до п'яти варіантів тексту листа. Під час відправлення програма автоматично та випадковим чином вибирає один із цих варіантів для кожного конкретного листа.

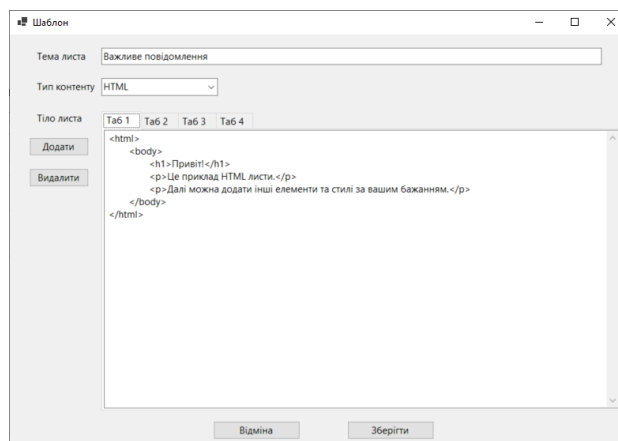


Рис. 2 – Вікно шаблону

Такий підхід забезпечує не тільки високий рівень доставки, але й робить кожне повідомлення особливим для його отримувача. Використання різних варіантів тіла листа допомагає забезпечити його доставку, а також підвищити імовірність, що лист буде прочитаний адресатом.

Вікно налаштувань складається з двох вкладок. Одна з них «Налаштування облікового запису» (рис. 3), де можна ввести дані відправника.

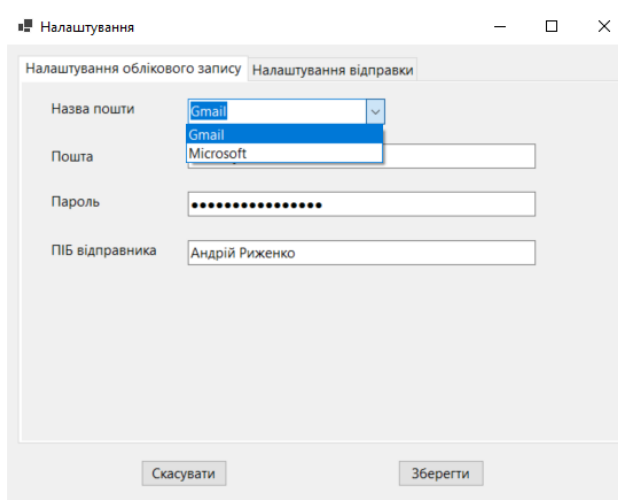


Рис. 3 – Налаштування облікового запису

При налаштуванні облікового запису для розсилки електронних листів користувачу слід враховувати деякі особливості залежно від сервісу електронної пошти, який він вибирає:

– Microsoft. Для відправки листів через обліковий запис Microsoft користувач повинен використовувати свій логін (електронну пошту) та пароль від облікового запису.

– Gmail. Для відправки листів через обліковий запис Gmail необхідно використовувати спеціальний токен замість звичайного паролю. Щоб отримати такий токен, користувач повинен відвідати <https://security.google.com/settings/security/appassw>

s сторінку та слідувати інструкціям для створення токена для сторонніх додатків. Отриманий токен слід ввести у поле для пароля при налаштуванні розсилки з Gmail.

Інша вкладка вікна налаштувань – «Налаштування відправки» (рис. 4). Вкладка «Налаштування відправки» розроблена з метою дати користувачам гнучкість у налаштуванні параметрів відправки електронних листів.

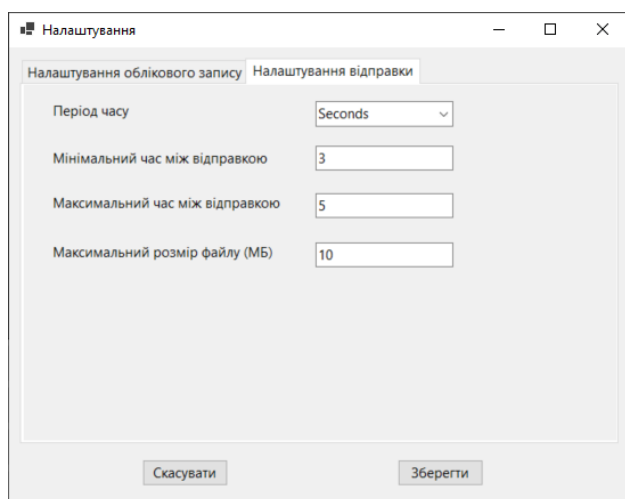


Рис. 4 – Налаштування відправки

Програма використовує розумний підхід до відправки листів. Перед кожною відправкою вона випадковим чином вибирає час затримки в межах, встановлених користувачем (від мінімального до максимального значення). Цей підхід забезпечує рівномірний розподіл відправок у часі, знижуючи ризик визначення листів як небажаних або автоматичної розсилки. Завдяки цьому листи мають більший шанс дійти до адресата без перешкод.

У програмі використовується бібліотека MailKit для надсилання електронної пошти. Ця бібліотека була обрана з кількох причин. MailKit надає повний набір функцій для роботи з протоколами електронної пошти, такими як SMTP, POP3 та IMAP. Це означає, що можна надсилати, отримувати та обробляти електронну пошту з будь-якого сервера, який підтримує ці протоколи. MailKit проста у використанні та має зрозумілий інтерфейс. Вона надає зручні методи для створення, відправки та отримання повідомлень електронної пошти. Можна легко налаштувати параметри, такі як адреси електронної пошти відправника та отримувача, тему повідомлення, вміст та додаткові вкладення. MailKit є потужним і надійним рішенням для роботи з електронною поштою. Вона має широку підтримку стандартів і протоколів, а також добре документована. Бібліотека активно підтримується та оновлюється розробниками, що забезпечує безпеку та стабільність у роботі з електронною поштою.

Початок процесу відправки повідомлень починається після натискання користувачем кнопки «Почати розсилку» та валідації полів, які необхідні для відправки повідомлень. Спочатку система перевіряє розширення доданих файлів для запобігання потрапляння до відправки непідтримуваних форматів, якщо розширення файлу не входить до списку підтримуваних форматів, таких як jpeg, jpg та pdf, система показує виняток «NotImplementedException». Після того, як система перевірила усі додані користувачем файли, створюється екземпляр SMTP клієнта. Далі система перевіряє, який поштовий сервіс було обрано у налаштуваннях програми, а саме Gmail чи Microsoft, та залежно від вибраного поштового сервісу, відбувається підключення до відповідного SMTP-сервера, аутентифікація SMTP клієнта. У випадку, якщо тип поштової скриньки не є Gmail чи Microsoft, система показує виняток «ArgumentOutOfRangeException». Після цього розпочинається цикл відправлення електронних листів. Після того, як усі листи були відправлені, програма закриває з'єднання SMTP клієнта.

Цикл починається з перевірки, чи є запит на зупинку циклу від користувача, котрий може бути визваний натисканням кнопки «Зупинити розсилку». Якщо так, процес завершується. Якщо ні, то система реєструє початок процесу надсилання інформації до файлу логування, створює та наповнює об'єкт MimeMessage бібліотеки MimeKit, перевіряє тип тіла листа (HTML чи звичайний текст), який користувач вибирає з дроп-дауна при заповненні шаблону листа, додає вкладення (якщо вони були додані користувачем), надсилає електронний лист і повідомляє про прогрес на UI для відображення прогрес-бару. Після відправлення листа, система перевіряє, чи є ще люди, яким треба надіслати лист. Якщо ні – цикл завершується. Якщо так, то цикл продовжується з наступним адресатом.

Тестування

У рамках роботи для реалізації unit-тестування було вибрано фреймворк xUnit. Цей інструмент є одним з найпопулярніших серед розробників завдяки своїй гнучкості, надійності та простоті використання. xUnit дозволяє легко створювати, організувати та виконувати тестові випадки, що спрощує процес пошуку та усунення помилок у коді.

Також для ефективного unit-тестування важливо мати можливість імітувати роботу зовнішніх залежностей або служб, які можуть бути використані у блоці коду, що тестується. Для цієї мети в роботі застосовується бібліотека Moq. Вона дозволяє створювати макети (mocks) об'єктів, які можна налаштовувати так, щоб вони поведилися певним чином під час виконання тестів.

Проведене тестування програми було спрямовано на перевірку ефективності та точності

відправки електронних листів. Як вхідні дані було взято 200 тестових скриньок на різних електронних поштових сервісах. У програмі було встановлено налаштування для затримки між відправками листів у діапазоні від 30 до 60 секунд. Цей час вибирався випадково в межах вказаного інтервалу. Було створено 5 різних текстів листів, які програма підставляла випадковим чином під час відправки. Заголовки листів були однакові. Після налаштувань програми було ініційовано відправку листів на зазначені 200 скриньок. Після завершення процесу відправки, усі 200 скриньок було перевірено. Основна ціль була переконатися, чи всі листи були доставлені до основних «Вхідних» повідомлень. Всі листи було успішно доставлено, однак на сервісі «Gmail» листи потрапили до вкладки «Промоакції».

Тестування демонструє, що програма ефективно і правильно відправляє електронні листи, дотримуючись заданих налаштувань. Така поведінка забезпечує впевненість користувачів у тому, що їх листи доставляються адресатам відповідно до очікувань.

Висновки

Розроблена програма для автоматичної розсилки електронних листів є елементом e-mail маркетингу. Вона включає в себе функціональність для імпорту списків електронних адрес та додавання додаткових матеріалів до листів, що забезпечує гнучкість у відправці. Зокрема важливо відзначити розумний підхід програми до відправки листів, використовуючи випадкові затримки, щоб знизити ризик визначення листів як небажаних. Це дозволяє листам успішно доходити до адресата. Під час розробки також враховано проблеми сумісності, що дозволяє користувачам налаштовувати максимальний розмір файлу для додавання, що враховує обмеження різних поштових сервісів. Використання бібліотеки MailKit дозволило реалізувати ефективну роботу з протоколами електронної пошти, забезпечуючи стабільність та безпеку відправки листів.

Загалом, застосунок для e-mail маркетингу є високоякісним інструментом, розробленим з урахуванням потреб користувачів та особливостей сучасних поштових систем. Його дизайн, функціональність та реалізація відображають глибокий досвід та знання в області розробки програмного забезпечення.

Проведене тестування програми підтвердило її здатність правильно та ефективно відправляти електронні листи відповідно до заданих налаштувань.

Список літератури

1. Lee B. et al. The Choice of Marketing Channel and Farm Profitability: Empirical Evidence from Small Farmers. *Agribusiness*. 2020. Vol. 36. № 3. P. 402–421. doi: 10.1002/agr.21640.

2. Filippou G. et al. Establishing the Link: Does Web Traffic from Various Marketing Channels Influence Direct Traffic Source Purchases? *Marketing Letters*. 2024. Vol. 35. № 1. P. 59–71. doi: 10.1007/s11002-023-09700-8.
3. Henderson K. C. et al. Content Analysis of IQOS Direct Mail and Email Marketing in the US. *Preventive Medicine Reports* 2024. Vol. 38. P. 102634. doi: 10.1016/j.pmedr.2024.102634.
4. Valenti A. et al. Direct Mail to Prospects and Email to Current Customers? Modeling and Field-Testing Multichannel Marketing. *Journal of the Academy of Marketing Science*. 2023. doi: 10.1007/s11747-023-00962-2.
5. Kadiyala Bh. et al. Data-Driven Approaches to Targeting Promotion E-mails: The Case of Delayed Incentives. *Production and Operations Management*. 2021. Vol. 30. № 3. P. 766–782. doi: 10.1111/poms.13316.
6. Create an Effective E-Mail Marketing Plan. *Nonprofit Communications Report*. 2019. Vol. 17. № 10. P. 1–8. doi: 10.1002/npcr.31312.
7. Chaparro-Peláez J. et al. May I Have Your Attention, Please? An Investigation on Opening Effectiveness in e-Mail Marketing. *Review of Managerial Science*. 2022. Vol. 16. № 7. P. 2261–2284. doi: 10.1007/s11846-022-00517-9.
8. Lorente-Páramo Á. J. et al. How to Improve E-Mail Click-through Rates – A National Culture Approach. *Technological Forecasting and Social Change*. 2020. Vol. 161. P. 120283. doi: 10.1016/j.techfore.2020.120283.
9. Vermeir N. Desktop Development. Introducing .NET 6, by Nico Vermeir. *Apress*. 2022. P. 65–123. doi: 10.1007/978-1-4842-7319-7_4.
10. Zhang M. et al. Consistent or Not? An Investigation of Using Pull Request Template in GitHub. *Information and Software Technology*. 2022. Vol. 144. P. 106797. doi: 10.1016/j.infsof.2021.106797.
11. Li D. D., Liu X. Y. Research on MVP Design Pattern Modeling Based on MDA. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 166. P. 51–56. doi: 10.1016/j.procs.2020.02.012.
12. García R. F. MVP: Model–View–Presenter. *iOS Architecture Patterns*, by Raúl Ferrer García. *Apress*. 2023. P. 107–144. doi: 10.1007/978-1-4842-9069-9_3.
13. Sharan K. Model-View-Controller Pattern. *Learn JavaFX 8*, by Kishori Sharan. *Apress*. 2015. P. 419–34. doi: 10.1007/978-1-4842-1142-7_11.
14. Syromiatnikov A., Weyns D. A Journey through the Land of Model-View-Design Patterns. *2014 IEEE/IFIP Conference on Software Architecture*. IEEE. 2014. P. 21–30. doi: 10.1109/WICSA.2014.13.

References (transliterated)

1. Lee B. et al. The Choice of Marketing Channel and Farm Profitability: Empirical Evidence from Small Farmers. *Agribusiness*, 2020, vol. 36, no. 3, pp. 402–421, doi: 10.1002/agr.21640.
2. Filippou G. et al. Establishing the Link: Does Web Traffic from Various Marketing Channels Influence Direct Traffic Source Purchases? *Marketing Letters*, 2024, vol. 35, no. 1, pp. 59–71, doi: 10.1007/s11002-023-09700-8.
3. Henderson K. C., et al. Content Analysis of IQOS Direct Mail and Email Marketing in the US. *Preventive Medicine Reports*, 2024, vol. 38, p. 102634, doi: 10.1016/j.pmedr.2024.102634.
4. Valenti A. et al. Direct Mail to Prospects and Email to Current Customers? Modeling and Field-Testing Multichannel Marketing. *Journal of the Academy of*

- Marketing Science*, 2023, doi: 10.1007/s11747-023-00962-2.
5. Kadiyala Bh. et al. Data-Driven Approaches to Targeting Promotion E-mails: The Case of Delayed Incentives. *Production and Operations Management*, 2021, vol. 30, no. 3, pp. 766–782, doi: 10.1111/poms.13316.
 6. Create an Effective E-Mail Marketing Plan. *Nonprofit Communications Report*, 2019, vol. 17, no. 10, pp. 1–8, doi: 10.1002/npcr.31312.
 7. Chaparro-Peláez J. et al. May I Have Your Attention, Please? An Investigation on Opening Effectiveness in e-Mail Marketing. *Review of Managerial Science*, 2022, vol. 16, no. 7, pp. 2261–2284, doi: 10.1007/s11846-022-00517-9.
 8. Lorente-Páramo Á. J., et al. How to Improve E-Mail Click-through Rates – A National Culture Approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, vol. 161, p. 120283, doi: 10.1016/j.techfore.2020.120283.
 9. Vermeir N. Desktop Development. Introducing .NET 6, by Nico Vermeir. *Apress*, 2022, pp. 65–123, doi: 10.1007/978-1-4842-7319-7_4.
 10. Zhang M. et al. Consistent or Not? An Investigation of Using Pull Request Template in GitHub. *Information and Software Technology*, 2022, vol. 144, p. 106797, doi: 10.1016/j.infsof.2021.106797.
 11. Li D. D., Liu X. Y. Research on MVP Design Pattern Modeling Based on MDA. *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 166, pp. 51–56, doi: 10.1016/j.procs.2020.02.012.
 12. García R. F. MVP: Model–View–Presenter. iOS Architecture Patterns, by Raúl Ferrer García. *Apress*, 2023, pp. 107–44, doi: 10.1007/978-1-4842-9069-9_3.
 13. Sharan K. Model-View-Controller Pattern. Learn JavaFX 8, by Kishori Sharan. *Apress*, 2015, pp. 419–34, doi: 10.1007/978-1-4842-1142-7_11.
 14. Syromiatnikov A., Weyns D. A Journey through the Land of Model-View-Design Patterns. *2014 IEEE/IFIP Conference on Software Architecture*, IEEE, 2014, pp. 21–30, doi: 10.1109/WICSA.2014.13.

Відомості про авторів (About authors)

Марусенко Олексій Миколайович – асистент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6911-2500>; e-mail: Oleksii.Marusenko@khp.edu.ua.

Marusenko Oleksii – Assistant of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6911-2500>; e-mail: Oleksii.Marusenko@khp.edu.ua.

Метельов Володимир Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-6296>; e-mail: volodymyr.mietielov@khp.edu.ua.

Mietielov Volodymyr – Ph. D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-6296>; e-mail: volodymyr.mietielov@khp.edu.ua.

Овсяніков Владислав Валерійович – аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: vladyslav.ovsianikov@khp.edu.ua.

Ovsianikov Vladyslav – Ph.D. student of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: vladyslav.ovsianikov@khp.edu.ua.

Риженко Андрій Сергійович – студент кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: andrii.ryzhenko@infz.khp.edu.ua.

Ryzhenko Andrii – Student of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: andrii.ryzhenko@infz.khp.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Марусенко О. М., Метельов В. О., Овсяніков В. В., Риженко А. С. Розробка десктопного застосунку для e-mail маркетингу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 20-25. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.03.

Please cite this article as:

Marusenko O., Mietielov V., Ovsianikov V., Ryzhenko A. Development of a desktop application for e-mail marketing. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 20–25, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.03.

Надійшла (received) 14.02.2024

Прийнята (accepted) 09.03.2024

УДК 004.422.8: 005.935.33

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.04

СЕРВІС СТВОРЕННЯ ТЕСТІВ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Б. Р. ПОПОВИЧ¹, Г. Е. ЗАВОЛОДЬКО^{2*}

¹ кафедра «Мультимедійних та інтернет технологій і систем», Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, УКРАЇНА

² кафедра «Системи інформації», Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: anna.zavolodko@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ У сучасному освітньому середовищі, що динамічно розвивається, нагальною стає потреба у розробці та впровадженні інноваційних інформаційних систем для створення тестів, які забезпечують високу адаптивність та персоналізацію навчального процесу. Підкреслено значення розвитку таких систем, звертаючи увагу на аналіз і порівняльний огляд вже існуючих платформ, як-от EasyTestMaker, Google Forms та Quizlet. Зроблений огляд дозволяє ідентифікувати ключові переваги та обмеження кожної з платформ, виходячи з їх функціоналу, зручності використання, та можливостей інтеграції з іншими освітніми інструментами. Основним фокусом дослідження є розробка сервісу TestHUB, що використовує потенціал штучного інтелекту для оптимізації процесу генерації тестових питань. Використання штучного інтелекту не лише сприяє автоматизації створення питань, але й забезпечує їх високу якість, адаптивність до потреб учнів, та можливість ефективної персоналізації тестів. Детально розглянуто технічні аспекти інтеграції штучного інтелекту в процес створення тестів, описуючи розроблені алгоритми автоматичного формування питань на основі заданих критеріїв і вимог. Проект TestHUB відкриває нові перспективи для освіти, пропонуючи викладачам та освітнім інституціям інструмент для створення тестів вищої якості з мінімальними часовими витратами. Реалізація такої системи має потенціал значно підвищити рівень освітнього процесу, роблячи навчання більш доступним, ефективним та відповідним до динамічних вимог сучасного освітнього середовища. ефективним, відповідаючи вимогам сучасного динамічного світу. Завдяки TestHUB, освіта стає інноваційною, прогресивною, і надзвичайно адаптивною, відкриваючи широкі можливості для ефективного навчання. Створення якісних тестів з TestHUB - ключ до успіху в сучасній освіті.

Ключові слова: Створення тестів; штучний інтелект; автоматизація; алгоритми генерації питань; оптимізація; адаптивність; відкритий штучний інтелект

AI-BASED TEST CREATION SERVICE

B. POPOVICH¹, G. ZAVOLODKO²

¹ Dept. MITS, NTU KhPI, magister, Kharkiv, UKRAINE

² Dept. IS, NTU KhPI, associate professor, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT In the modern educational landscape, constantly evolving, the necessity for developing and implementing innovative information systems for test creation becomes paramount. These systems are crucial for providing high adaptability and personalization in the learning process. The significance of such systems' development, focusing on analyzing and comparing existing platforms like EasyTestMaker, Google Forms, and Quizlet, are emphasized. This comparison allows identifying key advantages and limitations based on their functionality, ease of use, and integration capabilities with other educational tools. The primary focus of the research is the development of the TestHUB service, leveraging artificial intelligence's potential to optimize the test question generation process. The application of artificial intelligence not only facilitates the automation of question creation but also ensures high quality, adaptability to students' needs, and the capability for effective personalization of tests. The technical aspects of integrating artificial intelligence into the test creation process, detailing the algorithms developed for automatically generating questions based on specified criteria and requirements are extensively examined. The TestHUB project opens new perspectives for education, offering teachers and educational institutions a tool for creating higher quality tests with minimal time expenditure. The implementation of such a system has the potential to significantly elevate the educational process level, making learning more accessible, efficient, and aligned with the dynamic demands of the contemporary educational environment. Thanks to TestHUB, education becomes innovative, progressive, and exceptionally adaptive, opening broad opportunities for effective learning. Creating high-quality tests with TestHUB becomes the key to success in modern education.

Keywords: Test creation; artificial intelligence; automation; question generation algorithms; optimisation; adaptability; Open AI

Вступ

Актуальність дослідження полягає у необхідності розробки та впровадження ефективних інформаційних систем для створення тестів, які б максимально задовольняли потреби сучасної освіти та навчального процесу.

Задачами дослідження було: аналіз основних функцій та характеристик існуючих платформ для створення тестів; виявлення потенційних можливостей для покращення процесу створення тестів з використанням ШІ; розробка та тестування алгоритмів для автоматизації генерації тестових питань; проектування та реалізація сервісу TestHUB

як інноваційного рішення у сфері освітнього тестування [1-4].

Мета роботи

Метою дослідження є аналіз та порівняння сучасних платформ для створення тестів, зокрема EasyTestMaker, Google Forms та Quizlet, для виявлення їх переваг та недоліків, а також розробка власного сервісу TestHUB, який інтегрує можливості штучного інтелекту для оптимізації процесу створення тестів.

Виклад основного матеріалу

Порівняння EasyTestMaker, Google Forms, Quizlet

Для виявлення сучасних аспектів сервісів створення та проходження тестів ми розглянемо три популярні платформи для створення та проходження тестів у навчанні та освітніх проектах EasyTestMaker, Google Forms, Quizlet

EasyTestMaker - це онлайн-платформа для створення, керування та проведення тестів та опитувань в освітньому середовищі. Платформа спрощує процес створення та оцінювання тестів для викладачів і надає студентам зручний спосіб проходження тестів та аналізу результатів [5,6].

Викладачі та організатори: можуть створювати нові тести, додавати питання різних типів (множинний вибір, заповнення пропусків, відкриті питання тощо); додавати, редагувати та видаляти питання, а також визначати вагу питань; генерувати тести з питань в базі даних або вибирати питання вручну, визначати час, доступність тесту, обмеження по спробам, підказки та інші параметри; оцінювати відповіді та надавати зворотний зв'язок.

Студенти та учасники: можуть входити в свої облікові записи, вибирати доступні тести і проходити їх; відповідати на питання, використовуючи різні типи відповідей, в залежності від налаштувань тесту; переглядати свої бали та аналізи, які можуть включати правильні та неправильні відповіді.

Методи тестування в EasyTestMaker:

Short Answer (Коротка відповідь): Цей метод дозволяє студентам надавати короткі текстові відповіді на питання. Викладачі можуть оцінювати відповіді на основі правильності і якості відповідей.

Multiple Choice (Множинний вибір): Викладачі можуть створювати питання, до яких студентам потрібно вибрати правильний варіант відповіді із списку варіантів.

Fill in the blank (Заповнення пропуску): Цей метод передбачає питання, у яких студенти мають заповнити пропуски в реченнях або тексті, вставляючи відсутні слова.

Section Heading (Заголовок розділу): Викладачі можуть використовувати цей метод для створення

заголовків розділів у своїх тестах, що допомагає організувати матеріал і полегшує навігацію студентів.

Сору Question (Копіювання питання): Завдяки цьому методу викладачі можуть копіювати питання або завдання, щоб швидко створювати подібні питання в одному тесті чи різних тестах.

Google Forms - це безкоштовний інструмент від Google для створення опитувань та анкет. Ця платформа може використовуватися як для навчання, так і для збору відгуків, опитувань і різних інтерактивних форм [7-9].

Викладачі та організатори: створювати анкети та тести з різними типами питань, включаючи питання з вибором однієї або кількох відповідей, текстові відповіді, шкали; визначати дату завершення, обмеження на кількість відповідей, створювати обов'язкові питання; після завершення анкети/тесту вони можуть переглядати та аналізувати зібрані дані, включаючи відповіді та статистику.

Студенти та учасники: можуть відповідати на питання анкети/тесту та надсилати їх для обробки; переглядати та зберігати копії своїх відповідей.

Інтерфейс Google Forms є простим і інтуїтивно зрозумілим, що полегшує створення опитувань, тестів і анкет, який широко використовується в освіті та інших сферах для збору даних і звітності.

Quizlet - це освітня платформа, яка надає можливості для створення, навчання та тестування з використанням навчальних карток (флеш-карток). Ця платформа допомагає студентам та викладачам вивчати матеріал, використовуючи інтерактивні методи [10,11].

Викладачі та освітній персонал: можуть створювати навчальні набори флеш-карток для своїх студентів з питаннями і відповідями, а також прикріплювати зображення та аудіофайли; групувати флеш-картки в набори для певних тем або предметів; публікувати свої набори флеш-карток і ділитися ними зі своїми студентами за допомогою посилаєнь або інтеграції з платформами для навчання; можуть створювати тести і ігри на основі своїх флеш-карток для перевірки знань студентів.

Студенти та учні: використовують флеш-картки для вивчення і повторення матеріалу, а також можуть проходити тести та ігри на платформі; можуть переглядати та вивчати флеш-картки, перевіряти свої знання та повторювати матеріал; проходити тести, ігри та інші віджети, створені на основі флеш-карток; відслідковувати прогрес навчання.

Quizlet - це популярний інструмент для навчання та тестування, який полегшує процес вивчення і допомагає студентам підготуватися до іспитів та тестів.

Табл. 1 надає огляд різних аспектів платформ для створення та проходження тестів: EasyTestMaker, Google Forms і Quizlet за типами запитань,

напрямами знань; складністю запитань; методиці оцінювання тестування.

Ця табл.1 вказує на різницю між можливостями платформ для створення та проходження тестів: EasyTestMaker, Google Forms та Quizlet. Всі три платформи підтримують створення різних типів запитань, включаючи відкриті, закриті, так-ні, одновибірні та багатовибірні питання. Quizlet є єдиною платформою, яка дозволяє визначати теми для групування питань. В EasyTestMaker та Google Forms ви можете використовувати теги (в EasyTestMaker) та вказувати навички (в EasyTestMaker) для організації питань. У всіх трьох платформах можна вказати складність запитань: простий, середньої складності та складний та вони підтримують встановлення шкали балів для оцінювання та відобразити правильні відповіді на питання. Google Forms та Quizlet дозволяють надавати зворотний зв'язок студентам після проходження тесту. На жальній платформі не має вбудованого "інтелектуального помічника" (ІІІ).

Таблиця 1 – Порівняння платформ

Платформа	EasyTestMaker	Google Forms	Quizlet
Типи запитань			
Відкрите запитання	Так	Так	Ні
Закрите запитання	Так	Так	Так
Так-ні питання	Так	Так	Так
Одновибірні питання	Так	Так	Так
Багатовибірні питання	Так	Так	Так
Напрямки знань			
Теги	Ні	Ні	Так
Навички	Так	Ні	Ні
Теми	Так	Так	Так
Складність запитання			
Простий	Так	Так	Так
Середньої складності	Так	Так	Так
Складний	Так	Так	Так
Методика оцінювання тестування			
Шкала балів	Так	Так	Так
Правильність відповідей	Так	Так	Так
Зворотний зв'язок	Ні	Так	Так
Наявність помічника	ІІІ Ні	Ні	Ні

Вибір платформи повинен враховувати специфіку освітнього завдання та потреби в оцінці студентів [12]. Для цього ми спроектували сервіс

TestHUB, який на відміну від конкурентів має функцію ІІІ помічника для створення запитань до тестів.

Сервіс TestHUB

Загалом процес створення та управління тестами на онлайн-платформі TestHUB починається з входу на платформу, перевіряє авторизацію користувача, веде до особистого кабінету, далі - до генерації або введення тесту. Якщо тест відповідає вимогам, він зберігається. При невідповідності тесту відбувається його коригування через відповідні схеми рішень. Завершується процес збереженням тесту

На наведеному рис. 1 представлено алгоритм взаємодії користувачів із платформою онлайн-тестування. Він починається з відкриття платформи, де користувач проходить авторизацію. У випадку успішної авторизації користувач потрапляє в особистий кабінет, де може вибрати дію "створення тесту" чи переглянути існуючі тести. Якщо вибрано створення тесту, користувач наповнює форму з параметрами тесту. Далі, згідно з обраними параметрами, система генерує тест. Користувачу пропонується переглянути згенерований тест і вирішити, чи підходить він. Якщо так, тест зберігається в системі. У разі відхилення тесту, можливо повернутися до попередніх кроків алгоритму для коригування параметрів або створення нового тесту.

Процес створення індивідуалізованих тестів за допомогою алгоритмів штучного інтелекту передбачає комплексний аналіз та відбір запитань з бази даних, що відповідають заданим параметрам. Оцінювальна система базується на присвоєнні балів питанням згідно їх релевантності до критеріїв, які включають тип запитань, теги, складність, серед інших. Завдяки оптимізації процесу, такий підхід сприяє ефективності педагогічної діяльності, зменшуючи часові витрати та підвищуючи точність формування тестів. Адаптація та вдосконалення алгоритму можлива через інтеграцію нейронних мереж, що дозволить забезпечити адаптивність та гнучкість відбору матеріалу, відповідного до індивідуальних освітніх потреб.

ІІІ помічник сервісу TestHUB

Генерація та аналіз запитань з використанням штучного інтелекту у системі TestHUB передбачає збір параметрів від користувача для формування запиту. Цей процес включає автентифікацію, визначення критеріїв питань, та комунікацію з API OpenAI для отримання структурованих відповідей. Розроблена інструкція дозволяє системі генерувати питання, які точно відповідають заданим вимогам, забезпечуючи адаптивність та ефективність у створенні освітніх тестів.

В даному огляді ми проаналізували та порівняли три популярні платформи для створення та проходження тестів: EasyTestMaker, Google Forms та Quizlet. Кожна з цих платформ має свої унікальні особливості та можливості, що роблять їх корисними для використання в освітньому середовищі.

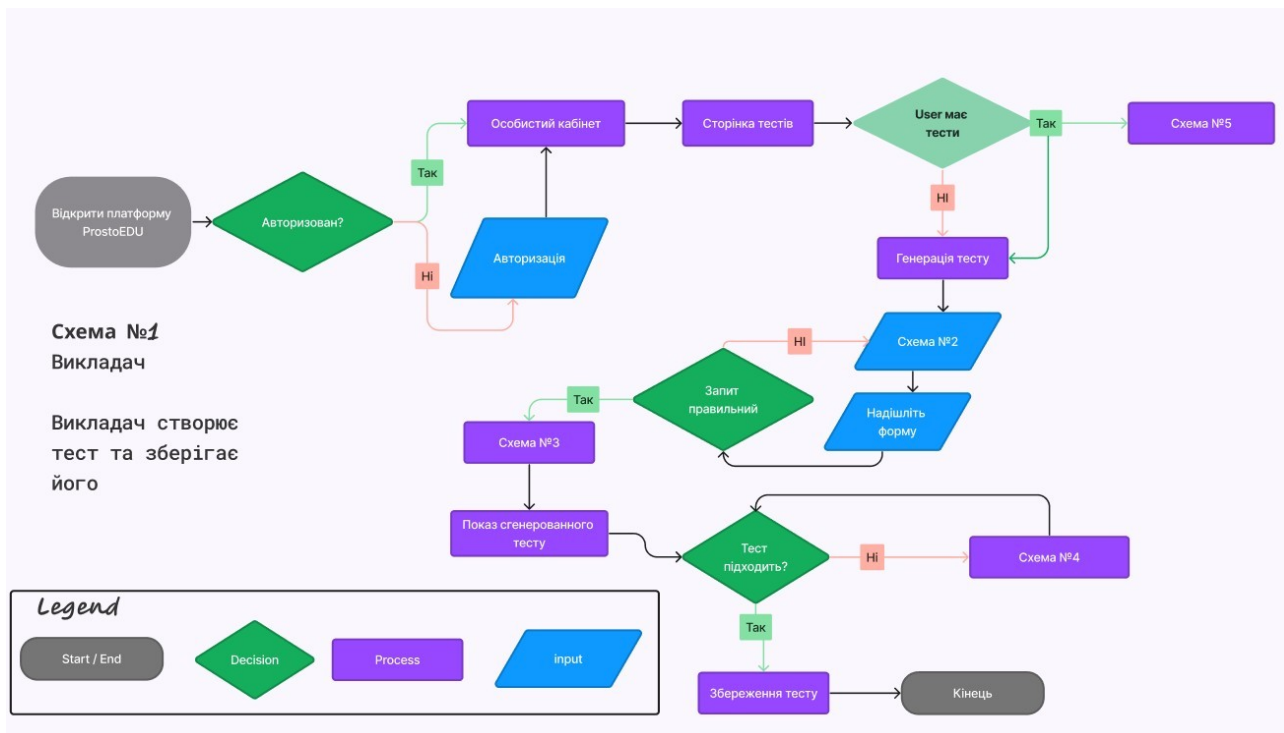


Рис.1 - Викладач створює тест

У процесі інтеграції з системою ШІ, користувачські запити з параметрами формують основу для генерації тестових питань. Система TestHUB відправляє ці запити до ШІ, яке, у свою чергу, генерує питання відповідно до отриманих даних та інструкцій. В разі отримання позитивної відповіді, система переходить до подальшої обробки і формування тестового питання. У ситуаціях, коли відповідь від ШІ є незадовільною або виникають помилки, система інформує користувача про проблему, запобігаючи подальшим непорозумінням у процесі тестування.

Обговорення результатів

Отримання відповіді від API штучного інтелекту ініціює процес парсингу даних у форматі JSON, який є фундаментальним для вилучення необхідної інформації для формулювання питань та відповідей для тесту. Ці дані зберігаються у відповідній базі даних, що сприяє створенню повноцінного питання. Подальше динамічне відображення питань у системі TestHUB забезпечує користувачам візуальний огляд сформованих питань, дозволяючи оцінити їхню відповідність заданим критеріям та ефективно інтегрувати у навчальний процес.

Висновки

З врахуванням постійного розвитку технологій та зростаючих вимог сучасної освіти, інформаційні системи для створення тестів мають великий

потенціал у покращенні навчального процесу. Порівняльний аналіз платформ для створення тестів, таких як EasyTestMaker, Google Forms та Quizlet, демонструє різноманітні можливості, але також вказує на необхідність подальшого удосконалення для забезпечення відповідності сучасним освітнім стандартам. Розробка та впровадження сервісу TestHUB, що інтегрує можливості штучного інтелекту для автоматизації процесу створення тестів, є кроком у напрямку оптимізації навчальних матеріалів та підвищення їх ефективності.

Використання інноваційних підходів, таких як персоналізація тестових питань та адаптивна генерація матеріалів на основі штучного інтелекту, дозволяє підвищити якість освіти та забезпечити краще відповідність потребам учнів.

Необхідно подальше дослідження та вдосконалення інформаційних систем для створення тестів з метою вдосконалення освітнього процесу та забезпечення його відповідності сучасним вимогам та тенденціям.

Список літератури

1. Дрехслер А., Хевнер А. Використання, продукування та поширення знань про дизайн у проєктах РСБ. *Матеріали 13-ї міжнародної конференції з досліджень науки про дизайн в інформаційних системах і технологіях*. Springer, Гейдельберг, 2018. С. 82-97.
2. Як ШІ революціонує автоматизоване тестування у 2024 році. 2024. URL: <https://tms-outsource.com/blog/posts/how-ai-is-revolutionizing-automated-testing-in-2024/>

3. Андерсон Т. Теорії для навчання з новими технологіями. *Виникнення та інновації в цифровому навчанні: Основи та застосування*. 2016. С. 35-50.
4. Аркудіс С., Байк К. Подолання розриву у взаємодії між іноземними та вітчизняними студентами у вищій освіті. *HERDSA Review of Higher Education*. 2014. 1. Р. 47-62.
5. EasyTestMaker. 2023. URL: <https://www.easytestmaker.com/>.
6. Устименко О. М. Використання сервісів онлайн тестування для контролю чеськомовної комунікативної компетентності. *Науково-методичний журнал "Іноземні мови"*. 2019. 2. Р. 47-59.
7. Швидко отримуйте дані завдяки Google Forms. 2023. URL: https://www.google.com/intl/uk_ua/forms/about/.
8. Закванді Р., Вулансарі П., Маула А. Р., Хасан С. та Андїтїя Н. Рефлексія навчання під час пандемії Covid-19: сприйняття вчителями тесту на основі Google-форм. *Міжнародний журнал освіти та викладання Zone*. 2022. 1(2). Р. 123-131.
9. Ferran Fritz M. Extended Technology Acceptance Model to Examine the Use of Google Forms-based Lesson Playlist in Online Distance Learning. *Recoletos Multidisciplinary Research Journal*. 2021. 9.1. Р. 1-1.
10. Making every student unstoppable. URL: <https://quizlet.com/mission>.
11. Purwantoro Aris, Asari Slamet, Maruf Nirwanto. The effectiveness of E-Learning madrasah in English teaching and learning. *Budapest International Research and Critics Institute (BIRCI-Journal): Humanities and Social Sciences*. 2021. 4.3. Р. 5234-5244.
12. Wang Y., Mäntylä M. V., Liu Z., & Markkula J. Зрілість автоматизації тестування покращує якість продукту - кількісне дослідження проєктів з відкритим кодом з використанням безперервної інтеграції. *Журнал систем та програмного забезпечення*. 2022. 188. Р. 111259.
1. Drechsler A., Hevner A. Utilizing, producing, and contributing design knowledge in DSR projects. *Proceedings of the 13th international conference on design science research in information systems and technology*. Springer, Heidelberg, 2018, pp. 82–97.
2. How AI is Revolutionizing Automated Testing in 2024. Available at: <https://tms-outsource.com/blog/posts/how-ai-is-revolutionizing-automated-testing-in-2024/>
3. Anderson T. Theories for learning with emerging technologies. *Emergence and innovation in digital learning: Foundations and applications*, 2016, pp. 35–50.
4. Arkoudis S., Baik C. Crossing the interaction divide between international and domestic students in higher education. *HERDSA Review of Higher Education*, 2014, 1, pp. 47–62.
5. EasyTestMaker. 2023. Available at: <https://www.easytestmaker.com/>.
6. Ustimenko O. M. Using online testing services to control Czech communicative competence. *Scientific and methodological journal "Foreign languages"*, 2019, 2, pp. 47-59.
7. Get data quickly with Google Forms. 2023. Available at: https://www.google.com/intl/uk_ua/forms/about/.
8. Zakwandi R., Wulansari P., Maula A. R., Hasan S., Anditya N. Learning reflection during Covid-19 pandemic: teacher perception toward google form based test. *International Journal of Education and Teaching Zone*, 2022, 1(2), pp. 123-131.
9. Ferran Fritz M. Extended Technology Acceptance Model to Examine the Use of Google Forms-based Lesson Playlist in Online Distance Learning. *Recoletos Multidisciplinary Research Journal*, 2021, 9.1, pp. 1-1.
10. Making every student unstoppable. Available at: <https://quizlet.com/mission>.
11. Purwantoro Aris, Asari Slamet, Maruf Nirwanto. The effectiveness of E-Learning madrasah in English teaching and learning. *Budapest International Research and Critics Institute (BIRCI-Journal): Humanities and Social Sciences*, 2021, 4.3, pp. 5234-5244.
12. Wang Y., Mäntylä M. V., Liu Z., & Markkula J. Test automation maturity improves product quality—Quantitative study of open source projects using continuous integration. *Journal of Systems and Software*, 2022, 188, pp. 111259.

References (transliterated)

Відомості про авторів (About authors)

Попович Богдан Романович - магістр кафедри «Мультимедійну та інтернет технології і системи», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри, м. Харків, Україна

Bogdan Popovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Master of dept. MITS; Kharkiv, Ukraine.

Заволодько Ганна Едвардівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри систем інформації ім. В.О. Кравця; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0000-8910; e-mail: ann.zavolodko@gmail.com.

Ganna Zavolodko – Ph. D., Associate Professor, Department of Information systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0000-8910; e-mail: ann.zavolodko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Попович Б. Р., Заволодько Г. Е. Сервіс створення тестів на основі штучного інтелекту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 26-30. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.04.

Please cite this article as:

Popovich B., Zavolodko G. AI-based test creation service. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 26–30, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.04.

Надійшла (received) 07.02.2024
Received 16.03.2024

УДК 66.041

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.05

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕННЯ ШАХТНИХ ПЕЧЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОЯКІСНОГО ПРОДУКТУ, ОТРИМАНОГО В ХОДІ ВИПАЛУ

В. С. ВИТЯГАНЕЦЬ, І. В. ПІТАК*

кафедра хімічної техніки та промислової екології, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: Inna.Pitak@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ Проведено аналіз шахтних печей для випалу вапняку. Виявлені недоліки роботи сучасних печей при випаленні вапняку полідисперсного складу. Розглянута конструкція печі з підвищеною ефективністю, яка забезпечує збільшення продуктивності на 20–25%, утилізацію відходів карбонатної сировини, зниження витрат тепла на 10%. В ході експериментальних досліджень було встановлено кінетичні процеси випалення. Надано дані експлуатації печі з рекомендованими конструктивними змінами. Було розглянуто питання розподілу топкових газів по перетину шахтної печі, характер руху матеріалу і газу, кінетика процесу. Розглянуто питання про використання газоподібного палива в шахтних випальних печах для виробництва вапна високої активності. Проведені дослідження вапняку високої якості, отриманого в процесі випалу в шахтній печі. За результатами скануючої електронної мікроскопії було доведено, що отриманий в процесі випалу продукт на 100% належить до кальцію оксиду без додаткових домішок чи шкідливих речовин. За результатами поросиметрії було досліджено вапно і визначені аспекти пористої структури матеріалу, таких як діаметр та загальний об'єм пор, площа поверхні, об'ємна й абсолютна щільності. Встановлено, що матеріал містить макропори, та демонструє комбінацію щільних та циліндричних пор. За допомогою азотної поросиметрії (за методом БЕТ методом математичного опису фізичної адсорбції, заснований на теорії полімолекулярної (багатошарової) адсорбції) була визначена площа поверхні, яка склала 84,0 м²/г. Кореляція між діаметром пор і площею поверхні була визначена за допомогою методу DFT (теорія функціоналу густини) і було встановлено наступне: питома площа поверхні матеріалу – 66,5 м²/г; засальний об'єм пор – 0,18 см³/г; діаметр пор – 4,08 нм. Також було встановлено, що досліджуваній зразок містив різні групи пор в діапазоні від 0,54 нм до 33,24 нм. Групи пор мали бімодальний розподіл у матеріалі, і саме пори меншого діаметру мали форму щілини, а пори більшого діаметра виглядали як циліндричні пори. Циліндричні пори є результатом термохімічних перетворень за участю складових компонентів.

Ключові слова: вапно; кінетика процесу; гранулювання; піч; математичний опис; теплообмін; адсорбція; викиди

ANALYSIS OF THE STRUCTURAL DESIGN OF MINE FURNACES AND RESEARCH OF THE HIGH-QUALITY PRODUCT OBTAINED DURING FIRING PROCESS

V. VYTYAHANETS, I. PITAK*

Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT An analysis of mine furnaces for calcining limestone was carried out. Deficiencies in the operation of modern furnaces during the firing of polydisperse limestone were revealed. The proposed design of the furnace with increased efficiency provides an increase in productivity by 20–25%, disposal of waste carbonate raw materials, and a reduction in heat consumption by 10%. During experimental studies, the kinetic processes of burning were established. Furnace operating data with recommended structural changes are provided. The question of the distribution of flue gases along the section of the mine furnace, the nature of the movement of material and gas, and the kinetics of the process were considered. The issue of the use of gaseous fuel in mine blast furnaces for the production of quicklime is considered. Studies of high-quality limestone obtained in the firing process in a mine furnace have been conducted. According to the results of scanning electron microscopy, it was proved that the product obtained in the firing process is 100% calcium oxide without additional impurities or harmful substances. Based on the results of porosimetry, the resulting lime was examined, and aspects of the material's porous structure were determined, such as the diameter and total volume of pores, surface area, bulk and absolute densities. Based on the results of porosimetry, it was established that the material contains macropores and exhibits a combination of slotted and cylindrical pores. Using nitrogen porosimetry (using the BET method), the surface area was determined, which was 84.0 m²/g. The correlation between the pore diameter and the surface area was determined using the DFT (density functional theory) method, and the following was established: the specific surface area of the material is 66.59 m²/g; total pore volume – 0.18 cm³/g; the diameter of the pores is 4.08 nm. It was also established that the test sample contained different groups of pores in the range from 0.54 nm to 33.24 nm. The pore groups had a bimodal distribution in the material, and the pores with smaller diameters were slit-shaped, while pores with larger diameters appeared as cylindrical pores. Cylindrical pores are the result of thermochemical transformations involving constituent components.

Keywords: lime; process kinetics; granulation; furnace; mathematical description; heat exchange; adsorption; emissions

Вступ

Шахтні печі – це тип промислових печей, які зазвичай використовуються для високотемпературних процесів, таких як виробництво чавуну, сталі та інших матеріалів. Розподіл теплових газів по

поперечному перерізу печі та кінетика розкладання матеріалу відіграють вирішальну роль у розробці та експлуатації шахтних печей.

У шахтній печі розподіл теплових газів, включаючи повітря для горіння та технологічні гази, має вирішальне значення для підтримки ефективного

та рівномірного теплообміну по всій печі. Гази зазвичай вводяться на різних рівнях або в зонах печі для оптимізації температурного профілю, необхідного для конкретного процесу. Такий розподіл гарантує, що матеріал всередині печі піддається бажаним тепловим умовам для належного розкладання та хімічних реакцій.

Шахтні печі часто використовуються для процесів, які включають розкладання або відновлення матеріалів. Кінетика розкладання матеріалу стосується швидкості, з якою відбуваються хімічні реакції в печі, зокрема реакції, які призводять до бажаного перетворення оброблених матеріалів.

Кінетика розкладання матеріалу залежить від різних факторів, включаючи температуру, склад газу, час перебування та властивості матеріалу. Розуміння кінетики допомагає визначити оптимальні умови роботи та конструкцію печі для досягнення бажаних швидкостей реакції та якості продукту. Ця інформація має вирішальне значення для максимізації продуктивності, мінімізації споживання енергії та забезпечення загальної ефективності процесу.

Для розробки шахтних печей інженери та дослідники вивчають розподіл теплових газів і кінетику розкладання матеріалу за допомогою теоретичного моделювання, обчислювального моделювання та експериментальних досліджень. Аналізуючи та оптимізуючи ці фактори, вони можуть проектувати печі, які забезпечують необхідні температурні профілі, структуру потоку газу та час перебування, необхідний для конкретного застосування обробки матеріалів.

Загалом, розподіл теплових газів і розуміння кінетики розкладання матеріалу є основними міркуваннями при розробці та експлуатації шахтних печей, що забезпечує ефективні та контрольовані промислові процеси.

М'який випал, також відомий як попередній нагрів або кальцинація, вапняку в шахтній печі є вирішальним етапом у виробництві вапна. Шахтні печі – це вертикальні печі, які зазвичай використовуються для випалу вапняку для отримання негашеного вапна або оксиду кальцію.

У процесі м'якого випалу в шахтній печі вапняк вводиться зверху і поступово рухається до низу за рахунок зустрічного потоку гарячих газів згоряння. Метою м'якого випалу є нагрівання вапняку до температури, при якій він піддається термічному розкладанню, вивільняючи вуглекислий газ і залишаючи вапно.

Процес м'якого випалу зазвичай включає наступні етапи:

1) Зона нагріву. У верхній частині шахтної печі вапняк піддається впливу високотемпературних газів, що утворюються в результаті спалювання палива. Гарячі газ рухаються у протитечії до вапняку, що опускається. Коли вапняк спускається через зону нагріву, він поглинає тепло від газів і поступово нагрівається.

2) Зона кальцинації. У середній частині шахтної печі вапняк досягає діапазону температур, необхідних для кальцинації. На цьому етапі вапняк проходить хімічну реакцію, відому як термічне розкладання, з виділенням вуглекислого газу (CO_2) і утворенням вапна (CaO). Реакція ендотермічна, тобто для її проходження потрібна теплота.

3) Зона охолодження. Коли вапняк продовжує рухатися в нижній частині печі, він охолоджується і досягає температури, придатної для обробки. Вапно, що утворюється під час випалу, залишається твердим і збирається на дні печі.

Процес м'якого випалу в шахтній печі спрямований на досягнення поступового та контрольованого нагріву вапняку для забезпечення рівномірного випалу та оптимальної якості виробленого вапна. Конкретна температура та час перебування, необхідні для м'якого випалу, залежать від бажаної якості вапна, конструкції печі та робочих параметрів.

Негашене вапно, отримане м'яким випалюванням у шахтній печі, широко використовується в різних галузях промисловості, включаючи сталеливарну промисловість, будівництво, очищення води та хімічні процеси. Він служить життєво-важливою сировиною або реагентом у таких процесах, як виробництво сталі, будівельних матеріалів і екологічних застосувань.

До вапна, що споживається для технологічних цілей різними галузями промисловості, і відповідно до її якості висувають різноманітні вимоги. Для забезпечення різних галузей народного господарства вапном необхідної якості перед виробництвом завжди стояло завдання розробки нових технологічних режимів та конструкцій печей, які б забезпечували стабільне отримання продукту із заданими властивостями. Основними агрегатами для багатотоннажного виробництва вапна є шахтні випалювальні печі, в яких як паливо використовуються доменний кокс, антрацит або сортове вугілля. Як правило, «тощі» види палива застосовують у виробництвах, де поряд у технологічному циклі використовується вуглекислий газ, який міститься в топкових газах з концентрацією 36–40%(мас).

Вапно, що містить активний кальцію оксид більше 95%, із загальним вмістом домішок до 1,4% та вмістом основної речовини, а саме активного кальцію оксиду більше 92% можна вважати вапном, з максимально ефективними характеристиками [1]. Виробництво вапна для таких технологічних процесів вимагає не тільки безперервної підготовки вапняку і крейди, а й використання природного газу переважно як палива, що унеможливує забруднення вапна продуктами згоряння [2].

Згадані вище групи продуктів включають хімічно осажену крейду, високодисперсний оксид і гідроксид кальцію, гідрохлорид кальцію, ароматизатори та кальцієві наповнювачі для медичної промисловості.

До основних труднощів термічної обробки вапняку з полідисперсними розмірами (фракція 20–

80 мм) у шахтній печі слід віднести обмежене проникнення газу (метану) у шар матеріалу у горизонтальному напрямку, тобто розподіл газу за перерізом шахти. Це призводить до нерівномірного змішування газу з повітрям та неповного згорання газоподібного палива. Відомі технічні рішення, спрямовані на інтенсифікацію процесів горіння, наприклад, за рахунок примусового відхилення смолоскипа або установки балкових пальників не вирішують проблеми [1, 2].

Для термічної обробки вапняку зазначеної фракції з регульованою температурою теплоносія на підставі проведених нами досліджень на напівзаводській модельній печі, що має шахту у вигляді прямокутного сектора з розмірами 0,5×1,2 м та висотою 7,5 м, пропонується піч з такими особливостями:

1) спалювання палива здійснюється поза шаром матеріалу в камерах згорання з отриманням продуктів горіння заданої температури;

2) для забезпечення рівномірного розподілу теплоносія і зниження аеродинамічного опору рух газів у зоні випалу відбувається в перпендикулярному напрямку щодо матеріалу, що опускається по шахті;

3) в зоні охолодження перед вивантаженням, для збереження інтенсивного теплообміну, рух випаленого матеріалу та повітря приймається протитечійним;

4) здійснення в одній печі принципів протитечії та поперечного струму досягається зміною поперечного перерізу шахти у відповідних зонах (теплообміну та зоною випалу), а також кутом розкриття конусної частини печі в зоні вивантаження.

Використання альтернативних джерел енергії з метою виробництва чистого продукту для проведення процесу випалу вапняку проблематично, оскільки невідпрацьовані реакторні установки для реалізації процесу, а також досягнутий рівень досліджень [3, 4] не дозволяє сподіватися на організацію випального процесу в найближчому майбутньому багатотоннажного виробництва вапна.

Тому застосування газоподібного палива у шахтних печах для виробництва високоякісного випаленого вапна з високою активністю залишається необхідним прийомом.

Мета роботи

Метою цієї статті є опис і дослідження конструктивних та технологічних параметрів печі для випалу мінералів на газоподібному паливі та аналіз процесів, що відбуваються в ній, і дослідження отриманого продукту в процесі випалу.

Виклад основного матеріалу

Методологія проведення досліджень

– Проведення досліджень у шахтній печі

Дослідження процесів проводили на холодній та гарячій аеродинамічній моделі, виконаній у вигляді сектора промислової печі. Розігріта макетна шахта мала прямокутну форму з розмірами в плані 0,5×1,2 м і висотою 7,5 м. Модель печі мала наступні зони: зону

нагріву (40% корисної висоти шахти від висоти засипки), зону випалу (40% висоти засипки) та зону охолодження (20% від висоти засипки). Три фурми для подачі димових газів були встановлені нижче межі передбачуваної зони підігріву та розпалу та на половині зони розпалу. У зоні встановлення фурми відбувається зменшення внутрішнього розміру моделі за рахунок виступу корпусу фурми на 10–15 %. Зовні, внутрішні частини печі фурми з'єднані з футеровочним бортом легкою литою вогнетривкою цеглою, в якій вмонтовані і працюють пальники типу ГПН-3. Газовий пальник ГПН призначений для спалювання природного і зрідженого газу з примусовою подачею повітря.

Дослідженню підлягав природний газ із теплою згорання 35,6 МДж/м³ та щільністю 0,73 кг/м³. Враховуючи можливість використання рециркулюючого повітря із зони охолодження, температура повітря, що подається в пальники, приймалася від 150 до 200°C, коефіцієнт витрати повітря склав 1,1, тиск у топці від 50 до 100 Па. Довжина полум'я пальника була прийнята в інтервалі від 0,5 до 0,6 м, відповідно факел закінчувався на виході з фурми. Фурми, нижче зони підігріву встановлені у вигляді кола через 120°, а в зоні випалу фурми по відношенню до попередньої зміщені на 60°, тобто, вони встановлені один від одного через 120°, але зміщені щодо попередніх на 60°. Повітря нагнітається в пальники та борови; вентиляторами в борови подавалося холодне повітря; вимірювання витрати повітря здійснювалося за допомогою діафрагм та мікроманометрів. Відведення повітря з печі здійснювалося за допомогою вентиляторів через систему циклонів, а потім у димову трубу.

Для виміру температур по висоті печі та на виході з фурм встановлені термометри у захисних чохлах. Повітря для охолодження вапна вводилося в нижню частину конічного бункера, який мав кут розкриття конуса 30°, а на виході мав валковий зволожувач. Проби газу, що відбираються по висоті печі та на виході, аналізувалися за допомогою газоаналізатора, хімічний недопал визначали наступним чином. В апарат завантажували вапняк (CaCO₃ – 98,5%, MgO – 0,2%) полідисперсного складу з вмістом фракції 27 мкм у кількості 30% та фракції 0,065 мкм у кількості 70%, загальна витрата природного газу становила 38,7 м³. Холодна аеродинамічна модель була виконана з прозорого скла та відповідала 1/10 передбачуваної промислової печі діаметром 3,5 м. Область поширення газового потоку в шарі матеріалу визначалася шляхом фіксування забарвлених ділянок шматкової засипки. Як індикатор кольорової реакції застосовувалася взаємодія парів йоду, що міститься в повітрі, що імітує газ, з крохмалем, нанесеним на поверхню шматків вапняку шаром ~0,001 м. Повітря з моделі відводилося за допомогою вентилятора. В моделі здійснювався перехресний рух матеріалу і газу з послідовним протитечійним відведенням газу через верх моделі.

Штуцери для подачі газу холодної моделі приблизно відповідали розташуванню фурм в гарячій моделі. Досліди проводилися як з використанням полідисперсного складу вапняку, так і з окремими фракціями.

До штуцерів подавалося повітря з насиченими парами йоду з витратою в 10–15 разів менше по відношенню сумарної витрати топкових газів, що утворюються, на виході з фурм.

– Визначення розподілу пор за розміром

Розподіл пор за розміром було отримано методом адсорбції азоту з використанням теорії функціоналу щільності загартованого твердого тіла (QSDFT – Quenched solid density functional theory), яка враховує шорсткість і неоднорідність поверхонь стінок пор. Деякі дослідники [5, 6] використовують ВІН (Barret, Joyner and Halenda) і метод ртутної інтрузійної поросиметрії (МІП) для опису розподілу пор за розміром, припускаючи циліндричну геометрію пор у матеріалах. У сорбції металів активну участь беруть колоїдні форми сульфідів, кремнезему та інших сполук. Було вирішено використовувати метод QSDFT для врахування неоднорідності стінок пор і достовірної характеристики мезопор в діапазоні від 2 до 35 нм. Метод QSDFT [7] дозволяє аналізувати більш широкий діапазон пор.

– Дослідження морфології та елементного аналізу матеріалу

Морфологію та елементний аналіз зразків отриманого продукту, (СаО) досліджували за допомогою скануючої електронної мікроскопії в парі з детектором енергодисперсійної спектроскопії (SEM-EDS – Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)). Досліджувані зразки просіювали, а потім висушували при температурі 40°C. Щоб отримати SEM-зображення, порошкоподібні зразки поміщали в контейнер для полегшення морфологічного спостереження. SEM спостереження зразків проводили на мікроскопі ZEISS EVO MA10 при прискорювальній напрузі 20 кВ. Детектор Bruker AXSX Flash 6/10 може відображати всі елементи, присутні в зразку, із загальною точністю близько 1% і чутливістю виявлення до 0,1% за вагою.

Обговорення результатів

Результати дослідження конструктивного оформлення та особливості процесів, що протікають у випалювальних печах

Аналіз даних про експлуатацію печей в Україні показує, що найчастіше використовуються шахтні печі циліндричного та гофрованого типів продуктивністю 4,2–10,5 т/год, діаметром шахти 3–5,5 м і висотою печі до 8 діаметрів з плоским профілем футеровки. Як правило, використовується система опалення з центральним і двома рядами периферійних інжекційних пальників, які не мають розширення [6]. Такі печі є агрегатами які споживають значну кількість палива, а саме 4003–4702 КДж/кг. Продукт, який отримують в процесі

випалу містить підвищене значення діоксиду вуглецю і має низьку реакційну здатність за часом гасіння готового випаленого продукту (більше 15 хвилин). Слід зазначити, що вміст активного кальцію оксиду не перевищує 65%. Зважаючи на зазначені вище характеристики можна зробити припущення, що готовий продукт матиме не зовсім високі характеристики, і отримання такого продукту в печах зазначеного типу дуже ускладнений. Очевидним є і той факт, що печі, які працюють на газоподібному паливі витрачають більше тепла ніж печі, які працюють на твердому паливі. Надмірна витрата тепла викликана неповним згорянням палива в шарі фільтрації через нерівномірний розподіл паливних газів в перерізі печі і несприятливі умови для газоповітряного перемішування в шарі вихідного матеріалу [8, 9]. Також слід зазначити, що в шарі матеріалу можуть виникати аномально високі температури і відносно низькотемпературні зони, що може призвести до спікання продуктів реакції і недостатнього недовипалу сировини. Проводячи аналіз розробок з удосконалення конструкції шахтних печей для усунення вищезгаданих недоліків, а саме, поліпшення процесу спалювання природного газу шляхом примусового відхилення полум'я і часткового видалення нагрітого повітря з топки перед зоною нагріву, не надають суттєвих переваг у вирішенні питання щодо поліпшення процесу спалювання фільтраційного палива [9].

Для термічної обробки полідисперсних порід з регульованою температурою теплоносія піч має відповідати наступним вимогам: спалювання палива має відбуватися поза шаром матеріалу з отриманням продуктів горіння певної температури; рух газу в зоні випалу повинен бути перпендикулярним для забезпечення рівномірного розподілу теплоносія і зменшення аеродинамічного опору.

Всі типи печей для випалу незалежно від конструктивного оформлення мають три основні зони. На неоднорідний розподіл швидкості газового потоку в шахтному перерізі впливає частка використовуваного вапняку і характер руху сировини в циліндричній частині печі.

У роботах [10,11] було проведено моделювання процесу перебігу матеріалу в реакторі шахтного типу і було встановлено, що оптимальні розміри шматків матеріалу для руху в печі наступні: дрібні шматки – 3 см, великі шматки – 7 см і при масовому вмісті фракцій від 30 до 70% відповідно. Слід зазначити, що наведене співвідношення за фракційним складом може бути досягнуто до подачі матеріалу в піч при його збагаченні з використанням фотоелектронного сепаратора [12].

Існує твердження, що співвідношення внутрішнього діаметру печі (D_f) до шматків вапняку (d) має бути в межах від 43 до 50 для подачі у шахтну піч, і розмір «d» не впливає на розподіл газового потоку. Виходячи з цього твердження отримуємо той факт, що вапняк повинен подаватися в піч певною фракцією $d=70-80$ мм, при внутрішньому діаметрі печі $D_f=3,7-5,5$ м.

Однак, навіть при такому фракційному складі матеріалу спостерігається відмінність привіської та пристінної швидкостей в зоні випалу, з переважанням привіської. Цього можна уникнути, якщо використати декілька отворів, через які буде вивантажуватися вапно.

Кальцинування вапняку відбувається в умовах щільного шару рухомого пічного газу і фільтрації через цей шар. Для випадків, коли кусковий шар матеріалу нагрівається гарячими газами, час повного розкладання вапняку (умовний час), може бути розрахований рівнянням [13]:

$$\tau_f = \frac{Q_{nm} \cdot \rho_v \cdot C_{CaCO_3} \cdot r_v}{300 \cdot \alpha \cdot \lambda_0 \cdot \Delta T_2} \cdot \left[(1 - \beta \cdot T) \cdot \left(\lambda_0 + \frac{\alpha \cdot r_v}{2} \right) - \frac{1}{4} \cdot \beta \cdot \alpha \cdot \Delta T_2 \cdot r_v \right], \quad (1)$$

де Q_{nm} – питома витрата тепла, кДж/кг; ρ_v – щільність вапняку; $\rho_b = 2553$ кг/м³; C_{CaCO_3} – вміст карбонату кальцію, %_{мас}; r_v – радіус шматка вапняку, м; α – коефіцієнт теплопередачі в діапазоні температур від 900 до 1300°C; $\alpha = 62,85 \div 838$ кДж/(м²·год·К); ΔT_2 – різниця температур між газоподібним середовищем і речовиною, °C; λ_0 – теплопровідність при 0°C, кДж/(м·сек·К); β – температурний коефіцієнт; $\beta \sim 0,42 \cdot 10^{-3}$,

$$\lambda_0 = \lambda_T / (1 + \beta \cdot T), \quad (2)$$

де λ_T – теплопровідність матеріалу, кДж/(м·сек·К).

У загальному випадку час перебування матеріалу (τ) у печі від моменту завантаження та до моменту вивантаження визначається сумою часів перебування у кожній із зон шахтної печі.

Час перебування матеріалу в початковій зоні вибираємо в інтервалі температур від 1300 до 300°C. Час перебування в зоні охолодження вибирається від 1000 до 100°C і враховується щільність продукту при ступеня розкладання вапняку 98%. Слід зазначити, що у зоні підігріву лімітуючою стадією є підведення тепла від газу до шматкового матеріалу і дорівнює $\sim 0,4 \div 0,45$ МДж/(м²·год·К) і даний процес протікає протягом 1 години. Загальний час перебування матеріалу в печі, а саме в зоні підігріву та зоні випалу складає приблизно 1,5 години, середня швидкість переміщення матеріалу в циліндричній частині печі становить 14,4 м/год, що дозволяє вважати шар умовно нерухомим.

Враховуючи вищевикладені факти слід зазначити, що найбільш важливою характеристикою всіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по перерізу шахти печі і глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Саме ці характеристики впливають на якість вапняку та рівномірність випалу матеріалу і саме ці параметри є основою конструктивного оформлення печей для випалу вапняку з використанням газоподібного палива.

Результати візуальних спостережень

Візуальні спостереження на холодній моделі показали, що при засипанні вапняку однорідного розміру (60–70 мм) та при подачі повітря в один або

кілька штуцерів спостерігалось найбільш яскраве та «густе» фарбування біля стін апарату на відстані від стін ~ 75 –82 мм. Під час просування матеріалу радіусом моделі до центру апарату спостерігалось зниження інтенсивності забарвлення. Подібна картина спостерігалась і при завантаженні в апарат вапняку фракцією 30–40 мм, хоча слід зазначити, що забарвлення ставало менш інтенсивним вже на відстані 45–55 мм від стінок моделі, а ось в центрі перерізу моделі апарату колір практично не змінювався. Іншою особливістю, яка спостерігалась, було те, що фарбування поширювалося вздовж вісі холодної моделі як вгору, так і вниз від точки введення газу. Якщо умовно прийняти товщину забарвлення за одиницю, то приблизно від точки введення газу вгору забарвлювалося 0,700–0,800 м матеріалу, а вниз 0,200–0,300 м матеріалу. В цілому, оцінюючи вищевикладені результати можна вважати, що вони свідчать переважно про кільцевий струм газів, що подаються в модель вздовж стінок і взаємодії зон протитечії і прямогоку відповідно вгору і вниз моделі. Збільшення витрати газу через штуцера в 1,5 рази змістило глибину фарбування на 5–7 мм у радіальному напрямку, що свідчить про неефективність цього методу. Відносно рівномірний розподіл забарвлення за поперечним перерізом шару було досягнуто, коли штуцера подачі повітря були висунуті вглиб шару на 40 мм, а шар матеріалу (вапняку) був полідисперсною системою, що складається з шматків розміром 40 м і 70 м при співвідношенні 20 та 80% відповідно. Шматки меншого розміру довільно розподілялися за обсягом моделі при завантаженні суміші, проте спостерігалось відносно рівномірний їх розподіл за обсягом досліджуваного шару, ступінь сегрегації становила приблизно 5–7%. У цьому випадку максимальне радіальне проникнення струменя повітря пропорційно наступному співвідношенні $H/d \sim 0,06 \cdot (H/d - H - \text{висота шатної печі, } d - \text{діаметр шматків вапняку})$.

При цьому також спостерігалось виникнення зон протитечії $H/d \sim 0,6$ –0,7 і прямогоку $H/d \sim 0,3$ –0,4. Такий ефект умовно-рівномірного розподілу фарбування спостерігався через зміну структури потоку матеріалу за рахунок висування штуцерів. Визначення глибини проникнення топкових газів з температурою 1250°C у радіальному напрямку проводилося і на гарячій моделі шляхом одночасного відбору проб газу, що відходить з печі та з шару шматкового матеріалу по діаметру шахти на рівнях, де розташовані фурми та на рівнях вище фурм та нижче фурм (на відстані 1,2 м). Середній розмір шматків завантаженого в піч вапняку дорівнював 37 і 76 мм. Кожен наступний відбір проб газу проводили через 540–600 с. Було проведено розрахунок статичних характеристик та коефіцієнтів рівнянь проникнення топкових газів у радіальному напрямку. Отримано рівняння для розрахунку проникнення топкових газів у радіальному напрямку:

$$G = k \cdot V_G \cdot d^{0.4} \cdot H^{0.3}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт, що враховує симплексне відкриття струменя потоку димових газів; $k = 4$; V_G – об’єм димових газів, м^3 ; $d^{0.4}$ – діаметр великих шматків матеріалу, м; $H^{0.3}$ – висота заповнення топки матеріалом, м.

Розмір середнього відхилення значень проникнення, розрахованих за рівнянням, становить $\pm 12\%$. Спостереження за поведінкою матеріалу безпосередньо біля фурм свідчить про відсутність вогнищ високої температури (рис. 1).

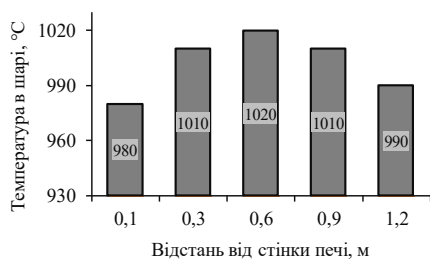


Рис. 1 – Температурне поле в області фурм у шарі матеріалу

При цьому, зона підтримки зазначеного розподілу температур по висоті становила приблизно 3–3,2 м.

Нижче цієї зони температура шару становила 860–900°C, при цій температурі подальше випалення припинялося. Проте встановлено, що порівняно з типовими шахтними печами у зоні підтримки температур 1050–1070°C спостерігається адиабатична витримка при температурах більше 1000°C у шарі 1,2–1,5 м, тобто за висотою шару нижче та вище точок введення топкових газів. Це свідчить про те, що існує (як і в холодній моделі) прямоток топкових газів нижче за зону введення і протиточія вище цієї зони, що подовжує зону випалу і дозволяє збільшити ступінь випалу на 3–4%, а продуктивність печі на 10%. На рис. 2 наведено принципову схему конструкції печі (а), а також розподіл температур і ступеня випалу по її висоті (б).

Піч для випалу вапняку (1), внутрішньо відкладена вогнетривкою цеглою (2). Кусковий матеріал завантажується у піч зверху через приймальну лійку (8) за допомогою скіпового ковша (9), який піднімається лебідкою по скіповій дорозі (10). Приймальна (завантажувальна) вирва (8) обладнана двоклапанним механізмом, який забезпечує від підсмоктування повітря через верх печі.

Спочатку матеріал для випалу засипається у верхню лійку, потім верхній клапан відкривається і матеріал потрапляє у проміжну камеру. Тільки після закриття верхнього клапана відкривається нижній, і матеріал вивантажується в піч. У печі кусковий матеріал рухається зверху до низу, звільняючись внизу за допомогою спеціального візка (7). Гарячі газу, утворені під час спалювання газоподібного палива, піднімаються вгору через шар матеріалу і

видаляються димососом через спеціальний короб (11) у верхній зоні печі. Газоподібне паливо спалюється в периферійних (3), (4) та центральному (5) пальниках. Центральний пальник розташований у нижній частині на розсікачі (6) [14].

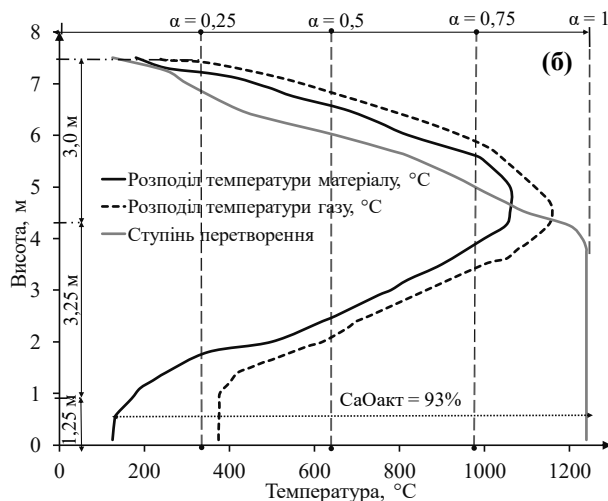
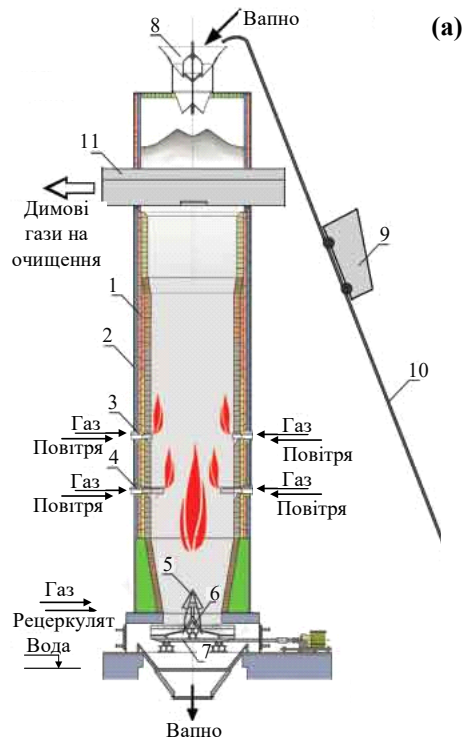


Рис. 2 – Схема конструкції печі (а), розподіл температур та ступеня випалу по висоті печі (б)

Результати експериментів свідчать про те, що дисоціація шматкового вапняку на початковому етапі процесу визначається фактором температури, а при ступені випалення шматка понад $\alpha = 80\text{--}85$ лімітуючим процесом є внутрішнє масоперенесення у поверхневій оболонці вапна. Конструкція печі, яка забезпечує прямоточно-протиточний принцип теплообміну, дозволяє здійснювати адиабатичну витримку в зоні випалу при температурах 1050–1070°C, що забезпечує можливість отримувати вапно із вмістом основної

речовини 96–97% та вмістом $\text{CaO}_{\text{акт}} > 90\%$. Досягнуте під час досліджень збільшення продуктивності на 20–25%, супроводжувалося зниженням питомої витрати палива на 10%.

Таким чином, отримані результати свідчать про доцільність розробки та широкого впровадження нової конструкції печі у різних галузях промисловості.

– **Дослідження отриманого продукту в результаті випалу. Результати СЕМ аналізу**

Після випалу, було отримано продукт, кальцію оксид, який можна бачити на рис. 3.



Рис. 3 – Отриманий після випалу кальцію оксид

Аналіз мікроструктури зразка матеріалу після випалу представлений на рис. 4.

Негашене вапно, або кальцію оксид – кристалічний матеріал, який має білий відтінок. Він формується в процесі випалу таких субстанцій, як крейда, доломіт, вапняк і інших речовин, що мають кальцієво-магнієву структуру.

Морфологія та розмір часток пов'язані з характеристиками їх кристалічної структури. Згідно з результатами, поверхня досліджуваного зразка є однорідною. Колір зразка був від світло- до темно-білого. Морфологічна структура зразка має умовно однорідну структуру. Зразок містить такі хімічні елементи як, кисень, кальцій, карбон та магній. З отриманого мепінгу матеріалу можна прослідити розташування того чи іншого хімічного елементу в зразку. Отриманий за результатами аналізу елементний склад матеріалу 100% підтверджує що в результаті випалу було отримано саме кальцію оксид. Щодо незначної кількості вмісту магнію в зразку. То, наявність магнію можна пояснити тим, що випалу піддаються субстанції, які мають кальцієво-магнієву структуру.

– **Результати дослідження матеріалу методом фізичної адсорбції**

Були проведені експерименти з адсорбції газу, щоб охарактеризувати площу поверхні, розподіл пор за розміром і об'єм пор, що відноситься до пор, доступних з поверхні пористих матеріалів. Утворення пористих матеріалів зазвичай відбувається під час кристалізації або наступних фаз обробки, в результаті чого утворюється структура, що містить ізольовані або взаємопов'язані пори, які можуть мати різні форми та розміри. Характеристика цих пористих матеріалів передбачає визначення розмірів їхніх пор

за допомогою даних сорбції газу [15]. Відповідно до класифікації IUPAC, розміри пор зразка підпадають під категорію ізотерм типу II, що вказує на непористі або макропористі матеріали. Ізотерми сорбції типу II, як показано на рис. 5, зазвичай спостерігаються з непористими або макропористими адсорбентами, що забезпечує необмежену багат шарову адсорбцію.

Також слід зазначити, що ізотерма зразка відноситься і до типу I (до типу Ia). Це є мікропористі тверді речовини з відносно невеликими зовнішніми поверхнями дають оборотні ізотерми типу I. Ізотерма типу I є увігнутою до осі p/p_0 (p/p_0 – відносний тиск), і адсорбована кількість наближається до граничного значення.

Це обмеження поглинання регулюється доступним об'ємом мікропор, а не площею внутрішньої поверхні. Різке поглинання при дуже низькому p/p_0 відбувається завдяки посиленій взаємодії адсорбент-адсорбція у вузьких мікропорах (мікропорах молекулярного розміру), що призводить до заповнення мікропор при дуже низькому p/p_0 .

Точка, де ізотерма демонструє перегин або коліно, називається точкою «В». Цей перегин означає завершення моношарового покриття та початок багат шарової адсорбції.

Як згадувалося раніше, матеріал демонструє ізотерми типу II, які є оборотними та зазвичай спостерігаються під час фізичної сорбції більшості газів на непористих або макропористих адсорбентах. Форма цих ізотерм є результатом необмеженої одношарово-багат шарової адсорбції, яка поширюється на високі значення p/p_0 . Коли коліно гостре, позначене як точка «В», це зазвичай означає завершення одношарового покриття. І навпаки, більш поступове викривлення, що означає менш чітку точку «В», свідчить про значне перекриття між одношаровим покриттям і початком багат шарової адсорбції. У таких випадках товщина адсорбованого багат шарового шару має тенденцію до збільшення, коли p/p_0 наближається до 1.

Відповідно до класифікації петель гістерезису IUPAC [16–20] досліджуваний матеріал відноситься до категорії петель H3. Петля типу H3 демонструє дві відмінні характеристики:

- гілка адсорбції нагадує ізотерму II типу;
- нижня межа гілки десорбції зазвичай знаходиться на p/p_0 , пов'язаному з кавітацією.

Петлі такого роду зазвичай спостерігаються в матеріалах, що складаються з нежорстких агрегатів пластинчастих частинок або у випадках, коли мережа пор містить макропори, які не повністю заповнені поровим конденсатом.

Аналіз розподілу пор за розміром, отриманий в результаті експериментів з адсорбції азоту на зразку, вказує на стійку тенденцію, коли зразок демонструє комбінацію щілинних і циліндричних пор. Адсорбатом був азот при температурі 77,35 K за методом BET. Кореляція між діаметром пор і площею поверхні була визначена за допомогою методу DFT, як показано на рис. 6.

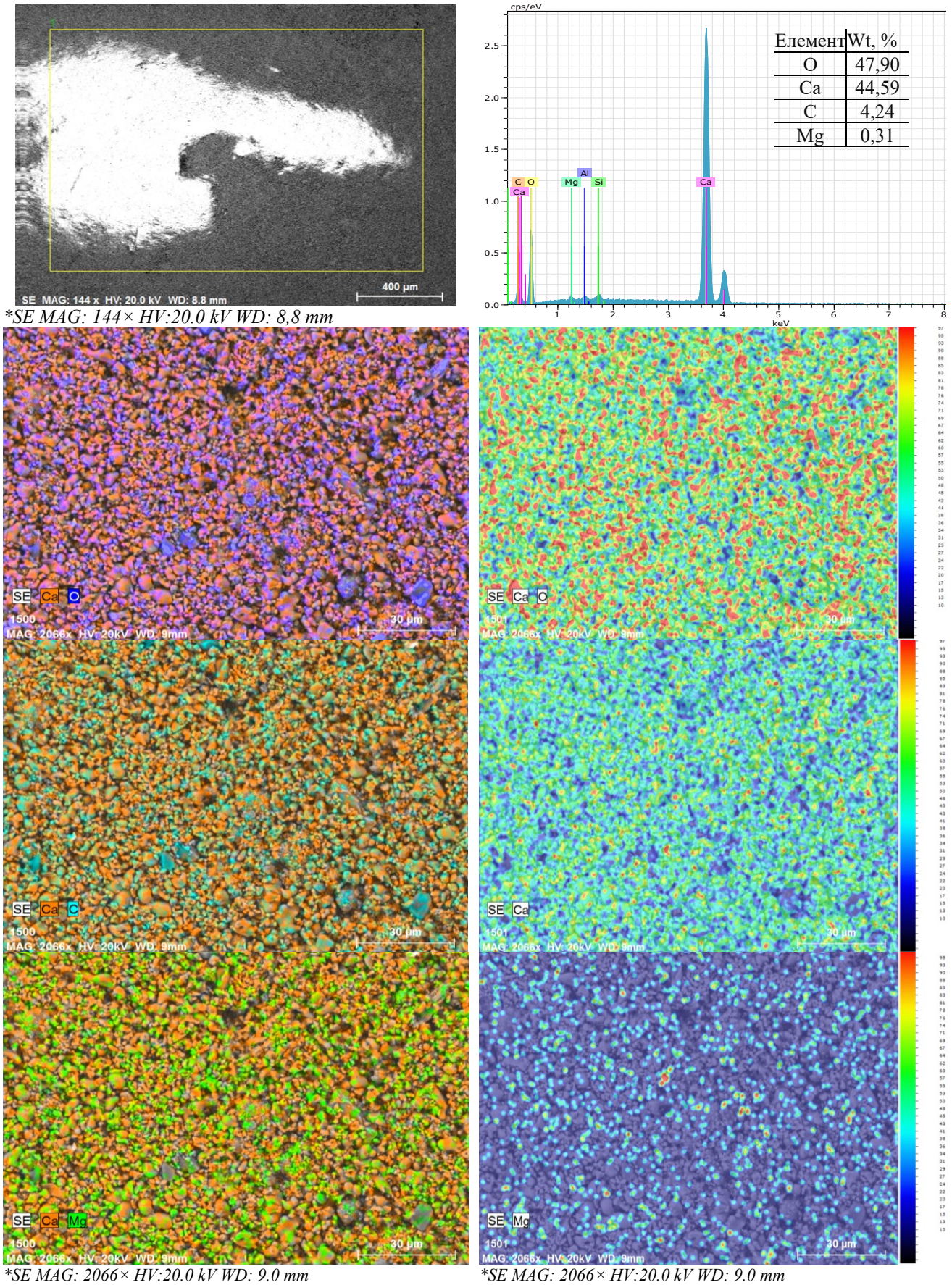


Рис. 4 – SEM-EDS аналіз матеріалу після випалу *Шкала, розташована праворуч має значення від 10 до 100 %, від синього до червоного кольору відповідно

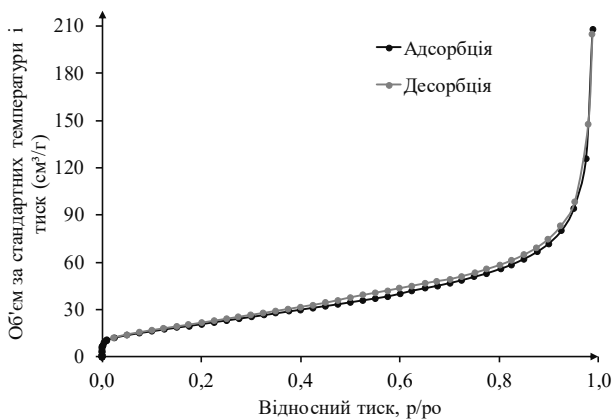


Рис. 5 – Тип ізотерм досліджуваного зразка

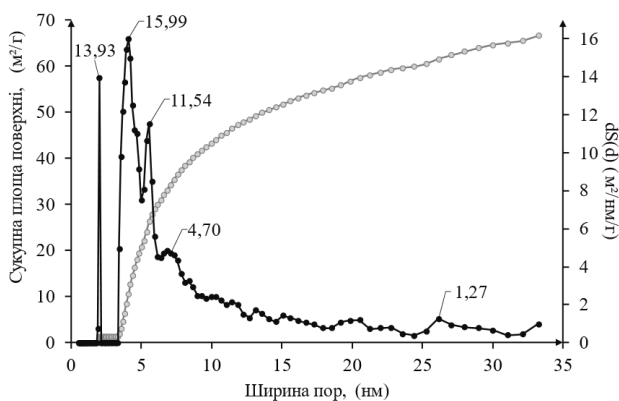


Рис. 6 – Розподіл пор за розміром за результатами тесту фізичної адсорбції зразка

Молекулярні моделі адсорбції, як теорія функціоналу густини (DFT), забезпечують точні описи явищ адсорбції. Використовуючи надані міжмолекулярні потенціали для взаємодії рідина-рідина та рідина-тверде тіло, ці моделі сприяють створенню ізотерм адсорбції в змодельованих порах.

У підході, заснованому на BET, азот використовувався як адсорбат при температурі 77,35 К. Кореляція між діаметром пор і площею поверхні була встановлена за допомогою методу DFT, і результати представлені в Табл. 1.

Таблиця 1 – Вимірювання адсорбції азотом для зразка.

Параметри	Зразок CaO
	DFT метод
Питома площа поверхні, м ² /г	66,59
Загальний об'єм пор, см ³ /г	0,18
Діаметр пор, нм	4,08
BET резюме	
Площа поверхні, м ² /г	84,0

Рис. 6 ілюструє поширеність мезопор у зразку. Дані про площу поверхні та адсорбцію були отримані з ізотерми адсорбції та обчислені методом BET. Крім того, метод DFT використовувався для оцінки

загального об'єму пор і середнього діаметра пор.

Дані таблиці показують питому поверхню (як визначено методом DFT) для досліджуваного зразка. Зокрема, досліджуваний зразок продемонстрував площу поверхні (сума BET) на рівні 84,0 м²/г. Крім того, середній діаметри пор зразка склав 4,08 нм. Аналогічна кореляція спостерігалася між питомою поверхнею та об'ємом пор зразка. Ці результати азотної поросиметрії можуть бути пов'язані з дослідженою мікроструктурою зразків для подальшого аналізу.

У досліджуваному зразку були очевидні різні групи пор в діапазоні від 0,54 нм до 33,24 нм. Ці пори показали бімодальний розподіл у матеріалі, причому пори меншого діаметру нагадували щілини, а пори більшого діаметра виглядали як циліндричні пори. Ці циліндричні пори є результатом термохімічних перетворень за участю складових компонентів. Наявність магнію в зразках обумовлює утворення циліндричних пор і подальшим збільшенням діаметра пор.

Висновки

Проведені результати досліджень свідчать про те, що дисоціація кускового вапняку на початковому етапі процесу визначається фактором температури, а при ступені випалу шматка понад $\alpha=80-85$ лімітуючим процесом є внутрішнє масоперенесення в поверхневій оболонці матеріалу. Конструкція печі, яка забезпечує прямоточно-протитечійний принцип теплообміну дозволяє здійснювати адіабатичну витримку в зоні випалу при температурах 1050–1070 °С, що забезпечує можливість одержувати вапно з вмістом основної речовини 96–97% і вмістом активного кальцію оксиду більше ніж 90%. Досягнуте при дослідженнях збільшення продуктивності на 20–25%, супроводжувалося зниженням питомої витрати палива на 10%. Фракційний склад вапняку, що завантажувався в піч дозволяє вважати, що можлива утилізація відходів класифікації карбонатної сировини фракції 20–40 мм. Також слід зазначити, що найбільш важливим параметром всіх печей є розподіл швидкостей газового потоку по перетину шахтної печі і глибина радіального проникнення газового потоку в шар матеріалу. Зазначені характеристики надають вплив на якість вапняку і рівномірність випалу вапна, що і стало основою конструкційного оформлення шахтних печей для випалу матеріалів з використанням газоподібного палива.

Таким чином, отримані результати свідчать про доцільність розробки і широкого впровадження конструкції печі в різних галузях промисловості.

Список літератури

- Карзун Е. Г., Боглаєнко Д. В., Шаповров В. П., Шаповров П. В. Дослідження процесу змочування вапна водою перед подачею її в гідратор у виробництві високодисперсного гідроксиду кальцію або пушонки.

- Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2007. № 1/3 25. С. 41–46.
- Шахин І. Х., Шапоров В. П., Лопухина О. А. Аналіз способів виробництва вапна та випалу карбонатної сировини. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2003. №3. С. 76–90.
 - Kuparinen K., Vakkilainen E. Green pulp mill: Renewable alternatives to fossil fuels in lime kiln operations. *BioRes*. 2017. №12(2). P. 4031–4048. doi: 10.15376/biores.12.2.4031-4048.
 - Manning R., Honghi T. Impact of cofiring biofuels and fossil fuels on lime kiln operation. *TAPPI Journal*. 2015. №7. P. 474–80. doi: 10.32964/tj14.7.474.
 - Thommes M. Physical adsorption characterization of nanoporous materials. *Chemie Ingenieur Technik*. 2010. 82. P. 1059–1073. doi: 10.1002/cite.201000064.
 - A. Alothman Z. A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials. *Materials*. 2012. № 5(12). P. 2874–2902. doi: 10.3390/ma5122874.
 - Grubeša N., Vračević M., Ranogajec J., Vučetić V. Influence of pore-size distribution on the resistance of clay brick to freeze-thaw cycles. *Materials*. 2020. №13(10). P. 2364. doi: 10.3390/ma13102364.
 - Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy Proc*. 2017. 120. P. 75–95. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.156.
 - Senegačnik A., Oman J., Širok B. Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation. *Appl Therm Eng*. 2008. №28 (7) P. 785–792. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.04.015.
 - Дорофєєнко С. О. Чисельне моделювання руху сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу. *Теоретичні основи технологій*. 2007. Т. 41. №2. С. 205–212.
 - Дорофєєнко С. О. Чисельне моделювання перебігу бі дисперсного сипучого матеріалу в реакторі шахтного типу. *Теоретичні основи хімічної технології*. 2007. Т. 41. №6. С. 625–629.
 - Шапоров П. В., Райко В.Ф., Себко В.В. Про можливість збагачення вапняків класу 40–150 мм із використанням фотоелектронного сепаратора. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2010. № 16. С. 139–153.
 - Матюхін В. І., Ярошенко Ю. Г., Журавльов С. Я., Морозова, Є. В., Матюхіна А. В. Технологічні можливості використання природного газу в шахтних печах для випалу вапняку. *Вісті вищих навчальних закладів. Чорна металургія*. 2020. 63 (1). С. 13–18.
 - Витяганець В. С., Шапоров В. П., Пітак І. В. Баранова А. О. Конструктивне оформлення та особливості процесів у випалювальних шахтних печах з використанням газоподібного палива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2(8). С. 96–100. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.14.
 - Matthias T., Katsumi K., Alexander V. and other. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem*. 2015. 87(9–10). P. 1051–1069. doi: 10.1515/pac-2014-1117.
 - Gabrijela H., Milica P., and other. A Brief Evaluation of Pore Structure Determination for Bioaerogels. *Gels*. 2022. 8(7). P. 438. doi: 10.3390/gels8070438.
 - Gritsenko C., Lepalovskij V., Volochaev M., Komanicky V., Gorkovenko A., Pazniak H., Gazda M., Andreev N., and Rodionova V.. Complex Study of Magnetization Reversal Mechanisms of FeNi/FeMn Bilayers Depending on Growth Conditions. *Nanomaterials*. 2022. 12. P. 1178. doi: 10.3390/nano12071178.
 - Liu C. A theoretical study of magnetization reversal in exchange biased synthetic antiferromagnet. *J. Magn. Magn. Mater*. 2022. 564(2). P. 170193. doi: 10.1016/j.jmmm.2022.170193.
 - Merkel M., Reginka M., Huhnstock R., and Ehresmann A. Polycrystalline exchange-biased bilayers: Magnetically effective versus structural antiferromagnetic grain volume distribution. *Phys. Rev. B*. 2022. 106. 014403. doi: 10.1103/PhysRevB.106.014403.
 - Congxiao Liu. Classification of hysteresis loops for exchange biased F/NM/F trilayer with antiferromagnetic interlayer coupling. *J. Appl. Phys*. 2023. 134. 043904 doi: 10.1063/5.0154790.

References

- Karzun E. H. Bohlaenko D. V., Shaporev V. P., Shaporev P. V. Doslidzhennia protsesu zmochuvannia vapna vodoiu pered podacheiu yii v hidrator u vyrobnytstvi vysokodispersnoho hidroksydu kaltsiiu abo pushonky. *Shhidnoievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 2007, 1/3 25, pp. 41–46.
- Shakhyn I. Kh., Shaporev V. P., Lopukhyna O. A. Analiz sposobiv vyrobnytstva vapna ta vypalu karbonatnoi syrovyny. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2003, 3, pp. 76–90.
- Kuparinen K., Vakkilainen E. Green pulp mill: Renewable alternatives to fossil fuels in lime kiln operations. *BioRes*, 2017, 12(2), pp. 4031–4048, doi: 10.15376/biores.12.2.4031-4048.
- Manning R., Honghi T. Impact of cofiring biofuels and fossil fuels on lime kiln operation. *TAPPI Journal*, 2015, №7, pp. 474–80, doi: 10.32964/tj14.7.474.
- Thommes M. Physical adsorption characterization of nanoporous materials. *Chemie Ingenieur Technik*, 2010, 82, pp. 1059–1073, doi: 10.1002/cite.201000064.
- A. Alothman Z. A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials. *Materials*, 2012, 5(12), pp. 2874–2902, doi: 10.3390/ma5122874.
- Grubeša N., Vračević M., Ranogajec J., Vučetić V. Influence of pore-size distribution on the resistance of clay brick to freeze-thaw cycles. *Materials*, 2020, 13(10), pp. 2364, doi: 10.3390/ma13102364.
- Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy Proc*, 2017, 120, pp. 75–95, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.156.
- Senegačnik A., Oman J., Širok B. Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation. *Appl Therm Eng*, 2008, 28 (7), pp. 785–792, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.04.015.
- Dorofeienko S. O. Chyselne modeliuвання rukhu sypuchoho materialu v reaktori shakhtnoho typu. *Teoretychni osnovy tekhnolohii*, 2007, vol. 41, 2, pp. 205–212.
- Dorofeienko S. O. Chyselne modeliuвання perebihu bi dyspersnoho sypuchoho materialu v reaktori shakhtnoho typu. *Teoretychni osnovy khimichnoi tekhnolohii*, 2007, vol. 41, 6, pp. 625–629.
- Shaporev P. V., Raiko V. F., Sebko V. V. Pro mozhlyvist zbahachennia vapniakiv klasu 40–150 mm iz vykorystanniam fotoelektronnoho separatora. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2010, 16, pp. 139–153.
- Matiukhin V. I., Yaroshenko Yu. H., Zhuravlov S. Ya., Morozova, Ye. V., Matiukhina A. V. Tekhnolohichni mozhlyvosti vykorystannia pryrodnoho hazu v shakhtnykh pechakh dla vypalu vapniaku. *Visti vyshchyykh navchalnykh zakladiv, Chorna metalurhiia*, 2020, 63 (1), pp. 13–18.

14. Vytiaganets V., Shaporev V., Pitak I., Baranova A. Constructive design and features of the processes in the roasting shaft furnaces by using gaseous fuel. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, 2 (8), pp. 96–100, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.14.
15. Matthias T., Katsumi K., Alexander V. and other. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.*, 2015, 87(9–10), pp. 1051–1069, doi: 10.1515/pac-2014-1117.
16. Gabrijela H., Milica P., and other. A Brief Evaluation of Pore Structure Determination for Bioaerogels. *Gels*, 2022, 8(7), pp. 438, doi: 10.3390/gels8070438.
17. Gritsenko C., Lepalovskij V., Volochaev M., Komanicky V., Gorkovenko A., Pazniak H., Gazda M., Andreev N., and Rodionova V. Complex Study of Magnetization Reversal Mechanisms of FeNi/FeMn Bilayers Depending on Growth Conditions. *Nanomaterials*, 2022, 12, pp. 1178, doi: 10.3390/nano12071178.
18. Liu C. A theoretical study of magnetization reversal in exchange biased synthetic antiferromagnet. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2022, 564(2), pp. 170193, doi: 10.1016/j.jmmm.2022.170193.
19. Merkel M., Reginka M., Huhnstock R., and Ehresmann A. Polycrystalline exchange-biased bilayers: Magnetically effective versus structural antiferromagnetic grain volume distribution. *Phys. Rev. B*, 2022, 106, 014403, doi: 10.1103/PhysRevB.106.014403.
20. Congxiao Liu. Classification of hysteresis loops for exchange biased F/NM/F trilayer with antiferromagnetic interlayer coupling. *J. Appl. Phys*, 2023, 134, 043904, doi: 10.1063/5.0154790.

Відомості про авторів (About authors)

Витяганець Валентин Сергійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3314-6917; e-mail: Valentyn.Vytiaganets@mit.khpi.edu.ua.

Valentin Vytiaganets – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", post-graduate student at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-3314-6917, e-mail: Valentyn.Vytiaganets@mit.khpi.edu.ua

Пітак Інна Вячеславівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

Inna Pitak – PhD, associate professor, National Polytechnic University "Kharkiv Polytechnic Institute", associate professor at the Chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5073-2942, e-mail: Inna.Pitak@khpi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Витяганець В. С., Пітак І. В. Аналіз конструктивного оформлення шахтних печей та дослідження високоякісного продукту, отриманого в ході випалу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 31-41. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.05.

Please cite this article as:

Vytiaganets V., Pitak I. Analysis of the structural design of mine furnaces and research of the high-quality product obtained during firing process. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 31-41, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.05.

*Надійшла (received) 15.01.2024
Прийнята (accepted) 02.03.2024*

УДК 681.518.22

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.06

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КРАБОВИХ ПАЛИЧОК З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ

I. В. ГРИГОРЕНКО*, С. М. ГРИГОРЕНКО, Д. О. АНДРЕНКО, Б. І. КУБРИК

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: grigmaestro@gmail.com

АНОТАЦІЯ Запропоновано варіант побудови системи контролю технологічного процесу виготовлення крабових паличок для забезпечення потреб підприємств харчової промисловості, що спеціалізуються на виготовленні продуктів із риби та морепродуктів. Крабові палички є всесвітньо відомим харчовим продуктом, що широко використовують і як окремих продукт, так і у якості компоненту харчових страв. Крабові палички на початку виготовляли із м'яса «білої риби», так званої сурімі. Основним інгредієнтом є перемелений фарш з м'яса білих океанічних риб із північної частини Тихого океану. Для того, щоб отримати смак схожий з оригінальним смаком крабів, в палички додають харчові домішки і додаткові інгредієнти. Необхідність впровадження системи контролю пов'язана із тим, що автоматизація процесу виробництва крабових паличок дає можливість ретельно дотримуватись технології виробництва і підвищити якість кінцевого продукту. Поставлена задача вирішена шляхом розробки інформаційно-вимірювальної системи для підтримки основних технологічних параметрів у встановлених межах допуску. Запропонована система здатна отримувати інформацію від об'єкту контролю завдяки використанню сучасних високоточних датчиків. Додатковою перевагою запропонованої системи є реалізація у ній ситуаційної системи з нечіткою логікою для визначення впливу параметрів технологічного процесу виготовлення крабових паличок на їх якість. Системи з нечіткою логікою набувають все більшого поширення на виробництві разом із застосуванням нейронних мереж у зв'язку з їх практично безмежними можливостями у вирішенні задач контролю та керування процесами і обладнанням. Проведено комп'ютерне моделювання, яке підтвердило, що створення евристичного аналізатору для визначення якості крабових паличок доцільно та необхідно для того, щоб не допустити виробництво неякісної продукції. Впровадження системи дає можливість уникати аварійних ситуацій на технологічному процесі та забезпечувати високу якість продукції. Наведено структурну схему системи, визначено основні її елементи. Здійснено аналіз похибок, який підтвердив необхідну високу точність запропонованого варіанту побудови системи контролю.

Ключові слова: крабові палички; інформаційно-вимірювальна система; нечітка логіка; датчик; похибка; вимірювання.

TECHNOLOGY CONTROL SYSTEM FOR CRAB STICK VIBRATION WITH FUZZY LOGIC

I. HRYHORENKO*, S. HRYHORENKO, D. ANDRENKO, B. KUBRIK

Department of of information and measuring technologies and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT A variant of the construction of a control system for the technological process of the production of crab sticks to meet the needs of food industry enterprises specializing in the production of fish and seafood products is proposed. Crab sticks are a world-famous food product that is widely used both as a separate product and as a component of food dishes. In the beginning, crab sticks were made from the meat of "white fish", the so-called surimi. The main ingredient is minced meat from white ocean fish from the North Pacific Ocean. In order to get a taste similar to the original taste of crabs, food additives and additional ingredients are added to the sticks. The need to implement a control system is due to the fact that the automation of the crab sticks production process makes it possible to carefully follow the production technology and thus improve the quality of the final product. The task was solved by developing an information and measurement system to support the main technological parameters within the established limits of tolerance. The proposed system is able to receive information from the object of control thanks to the use of modern high-precision sensors. An additional advantage of the proposed system is the implementation of a situational system with fuzzy logic in it to determine the influence of the parameters of the technological process of making crab sticks on their quality. Fuzzy logic systems are becoming increasingly widespread in production along with the use of neural networks due to their practically limitless possibilities in solving the problems of control and management of processes and equipment. Computer modeling was conducted, which confirmed that the creation of a heuristic analyzer for determining the quality of crab sticks is appropriate and necessary in order to prevent the production of low-quality products. Implementation of the system makes it possible to avoid emergency situations in the technological process and ensure high quality of products. The structural diagram of the system is presented, its main elements are defined. An error analysis was carried out, which confirmed the necessary high accuracy of the proposed version of the construction of the control system.

Keywords: crab stick; information and measurement system; fuzzy logic; sensor; error; measurement.

Вступ

Вимірювання значень технологічних параметрів, моніторинг і керування параметрами

технологічного процесу є на сьогодні поширеною практикою у будь якій галузі промисловості. Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС), що здатні вимірювати велику кількість технологічних

параметрів, а потім ще й обробляти цю інформацію дозволяють автоматизувати практично будь яке виробництво [1,2]. Харчова промисловість не є винятком. Крабові палички є всесвітньо відомим продуктом харчування і вирішенням питання підтримки їх якості на високому рівні займаються провідні світові вчені, що підтверджують роботи [3-5]. В Україні крабові палички виробляються згідно вимог ДСТУ 5097:2008 [6], який є діючим стандартом з 2009 року. Велика частина закуповуваної Україною китайської продукції не містить суріми, а складається із рослинного (соєвого) білка, крохмалю та яєчного білка, а також ароматизованих добавок. Підтримка якості та технології виробництва згідно стандарту можлива лише при застосуванні інформаційно-вимірвальних систем контролю. ІВС здатна отримувати вимірвальну інформацію, порівнювати параметри з встановленими значеннями та передавати отримані дані до електронно-обчислювальної машини (ЕОМ) для подальшої обробки даних [1].

Обробку даних пропонується здійснювати за допомогою системи з нечіткою логікою *fuzzy-logic* для визначення впливу зміни умов виробництва на якість крабових паличок.

Станом на зараз існує декілька алгоритмів нечіткої логіки. Найчастіше використовуються такі з них: алгоритми *Mamdani*, *Tsukamoto*, *Sugeno*, *Larsen*. Алгоритм *Mamdani* було запропоновано у [7] для побудови системи з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити вплив на якість води штучної екосистеми рівня розчинного кисню, рівня рН та температура. У роботі [8] здійснено вибір моделей для лінгвістичних змінних у нечіткому логічному висновку *Mamdani* і доведено його перевага перед іншими методами при оцінці якості продукції і послуг. Апарат нечіткої логіки дозволив у [9] встановити для другого рівня ІВС, де формується технологічний і метрологічний «образи» об'єкта контролю, вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на однорідність помелу зерна кави. У роботі [10] представлено систему, що використовує нечітку логіку як ефективний інструмент керування складними та невизначеними системами, такими як керування світлофорами і це може, покращити транспортний потік та знизити витрату палива.

Аналіз наукових публікацій показав широкі можливості та підвищений інтерес науковців до використання математичного апарату нечіткої логіки у промисловості та соціально-економічній сфері.

Мета роботи

Об'єктом розробки є інформаційно-вимірвальної системи контролю технології виробництва крабових паличок.

Мета роботи – розробка інформаційно-вимірвальної системи контролю на етапах технологічного процесу виробництва крабових

паличок, а саме: на етапі приготування суміші у міксері – температури (+22...+ 23) °С, рівня рН (4...9) од. рН та кількості обертів валу двигуна (85 ...100) об/хв; на етапі проходження парових барабанів – тиску (0,1...0,5) МПа та температури пару (+95...+ 100) °С; на етапі постерилізації – температури у трьох камерах (+100 °С, + 96 °С, + 8 °С), на етапі заморозки – температуру до – 18 °С. Похибка вимірювання по каналам не повинна перевищувати 1,5 %.

Другою метою роботи є побудова ситуаційної системи з нечіткою логікою для визначення впливу параметрів технологічного процесу виготовлення крабових паличок на їх якість.

Основна частина

На рис 1 наведено структурна схема інформаційно-вимірвальної системи контролю виготовлення крабових паличок.

До складу ІВС входять такі функціональні елементи: первинні вимірвальні перетворювачі: ПВП1 ПВП4, ПВП6 – ПВП9, що призначені для контролю температури на всіх етапах технологічного процесу; ПВП2 – призначений для контролю рівню рН при приготуванні суміші у міксері; ПВП3 – призначений для вимірювання кількості обертів валу двигуна міксера; ПВП5 – для виміру тиску пару на парових барабанах; мікроконтролер, що необхідний для обробки вимірвальної інформації, яка надходить від датчиків по інформаційній шині даних, керування даною інформацією, забезпечення обміну даними між окремими частинами схеми та електронно-обчислювальною машиною (ЕОМ), передачі інформації для відображення на цифровому відліковому пристрої; інтерфейсу – призначений для зв'язку мікроконтролера з ЕОМ; за допомогою пульта управління виконує початкове налаштування мікроконтролера та забезпечується його скидання; блок живлення (на схемі не показаний) забезпечує необхідну напругу для роботи усіх елементів ІВС. Цифровий відліковий пристрій (ЦВП) необхідний для цифрового відображення інформації про поточне значення параметрів контролю виготовлення крабових паличок. Першим кроком алгоритму роботи системи є початкове налаштування мікроконтролера. Далі система, відповідно до встановленого режиму опитування, виконує вибір вимірвального каналу та очікує данні від ПВП. На наступному етапі виконується зчитування мікроконтролером інформації з первинних вимірвальних перетворювачів. Інформація про результати вимірювань надходить до оперативного запам'ятовуючого пристрою мікроконтролера (ОЗП). Мікроконтролер обробляє отриману інформацію та передає результат виміру у ЕОМ або відображає на цифровому відліковому пристрої (за потребою). Якщо потрібно зробити новий вимір, то вертаємося до вибору вимірвального каналу. Цикл повторюється знову відповідно до встановленої послідовності опитування.

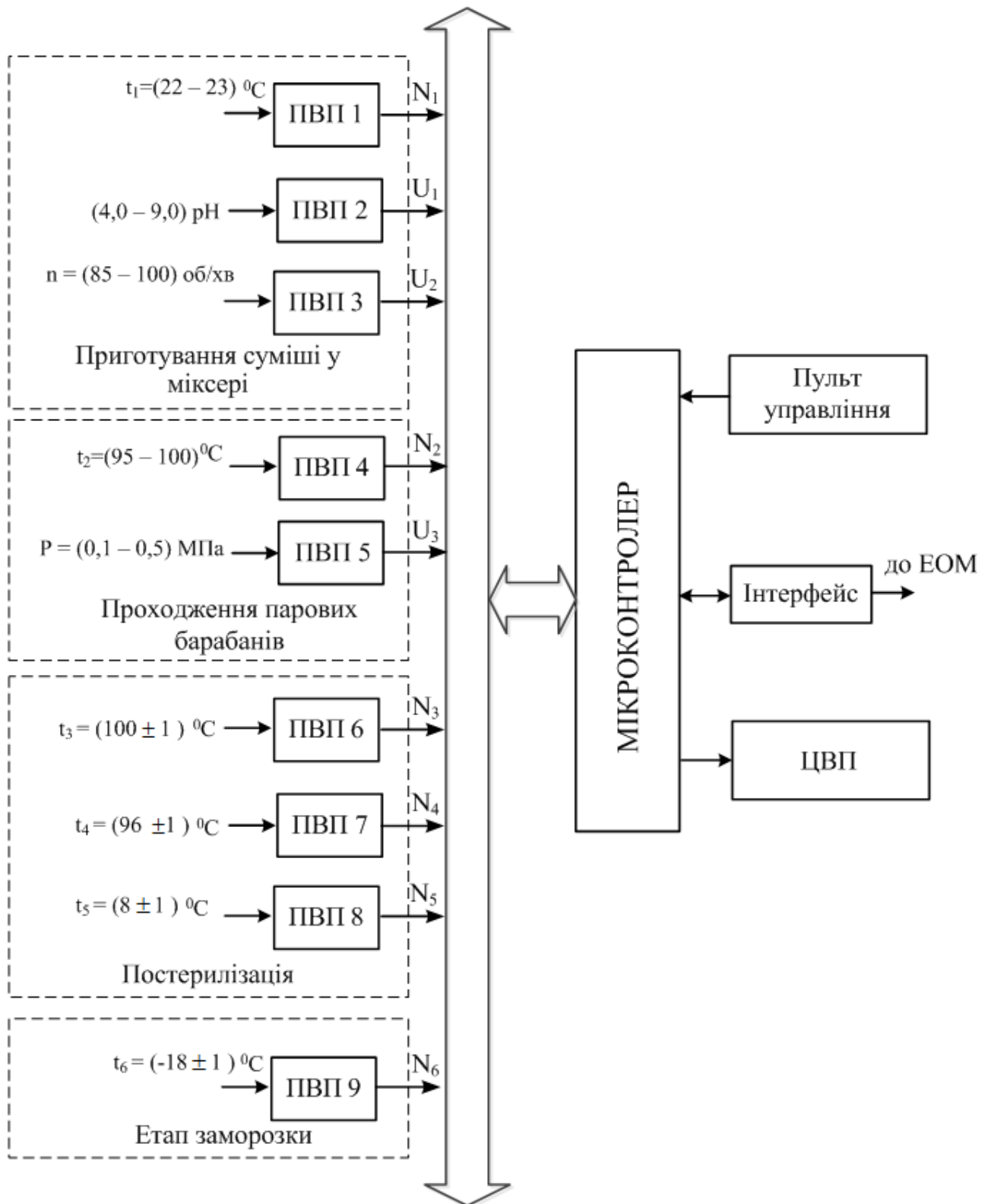


Рис. 1 – Структурна схема системи контролю виготовлення крабових паличок

До складі ІВС для контролю виробництва крабових паличок входять дев'ять вимірювальних каналів, що видають інформацію о температурі на всіх етапах виробництва, тиску пару на парових барабанах, рівню рН, кількості обертів валу

двигуна міксера. На першому рівні ІВС зазвичай вирішується задача призначення відповідних допусків для рівня кожного параметра, що контролюється. Такий підхід дає можливість визначити необхідні засоби вимірювань і значення довірчого

інтервалу похибок, які необхідно контролювати у робочих режимах. На цьому етапі доцільно вирішувати задачу прогнозу стану кожного вимірювального каналу [1].

Для побудови евристичного аналізатора використано інтерфейс користувача системи *fuzzy-logic*, який є додатком програми *MatLab*. Найбільш критичним етапом виготовлення крабових паличок є етап приготування суміші у міксері. При цьому необхідно контролювати температуру суміші у діапазоні від + 22 °С до + 23 °С, рівень рН у діапазоні від 4,0 до 9,0 одиниць рН, та кількість обертів валу двигуна міксера у діапазоні від 85 до 100 об/хв. У моделі зроблено три входи і один вихід. У якості першого входу обираємо показник – температура подробленої маси. У якості другого входу – рівень рН подробленої маси. Третій вхід це кількість обертів валу двигуна міксера. У якості вихідної величини обираю якість кінцевого продукту (смакові і харчові властивості отриманої суміші).

На першому етапі проектування здійснюється вибір і завдання вхідних і вихідного параметрів для системи з нечіткою логікою.

Вікно завдання вхідних та вихідних параметрів для запропонованої системи *fuzzy-logic* представлено на рис. 2.

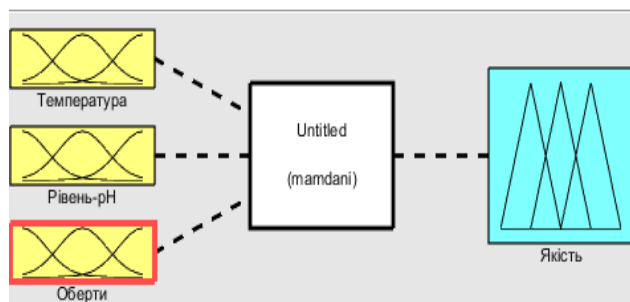


Рис. 2 – Вікно завдання вхідних та вихідних параметрів

На другому етапі задано межі зміни вхідних і вихідного параметрів.

1 вхід: функція належності для обраного вхідного параметру – температура у міксері. У пункті Range встановлено діапазон у якому змінюється функція (від +22 °С до +23 °С).

2 вхід: функція належності для обраної вхідної змінної – рівень рН води. У пункті Range встановлено діапазон у якому змінюється функція (від 4,0 до 9,0 одиниць рН).

3 вхід: функція належності для обраної вхідної змінної – кількість обертів валу двигуна міксера. У пункті Range встановлено діапазон у якому змінюється функція (від 85 до 100 об/хв).

Для усіх трьох функцій обрано закон розподілу Гауса.

Вихід: функція належності для обраної вихідної змінної – якість кінцевого продукту (смакові і харчові властивості отриманої суміші). У пункті Range встановлено діапазон у якому змінюється функція (від 1 до 100).

У вікні «правила» складено правила, які характеризують якість кінцевого продукту.

Деякі з них мають наступний вигляд:

1. Якщо рівень температури «*min*», рівень рН «*min*», та швидкість обертів валу двигуна міксера «*min*», то якість фаршу «погана».

2. Якщо рівень температури «*norm*», рівень рН «*min*», та швидкість обертів валу двигуна міксера «*norm*», то якість фаршу «погана».

3. Якщо рівень температури «*norm*», рівень рН «*norm*», та швидкість обертів валу двигуна міксера «*norm*», то якість «відміна» (рис. 3).

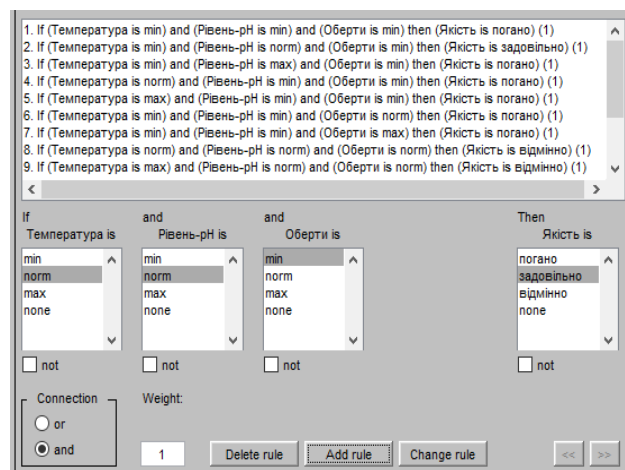


Рис. 3 – Вікно завдання правил

Поверхні відгуку при трьох можливих сполученнях параметрів, що впливають на якість фаршу для крабових паличок зображені на рис. 4-6.

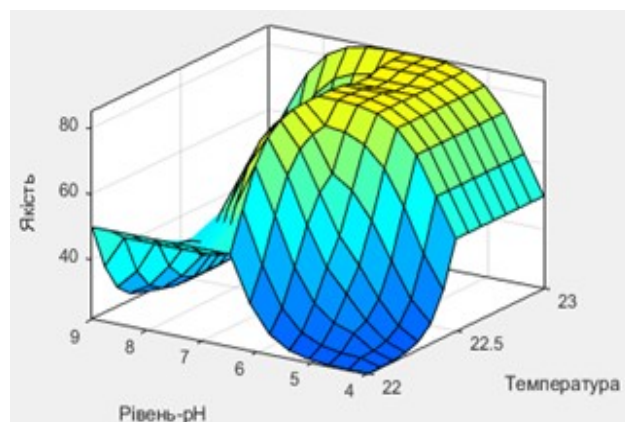


Рис. 4 – Поверхня відгуку значень температури та рівню рН, що впливають на якість фаршу для крабових паличок

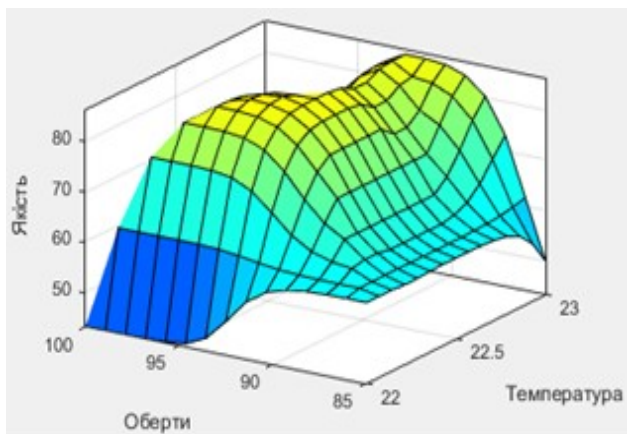


Рис. 5 – Поверхня відгуку значень рівня температури та кількості обертів валу двигуна міксера, що впливають на якість фаршу для крабових паличок

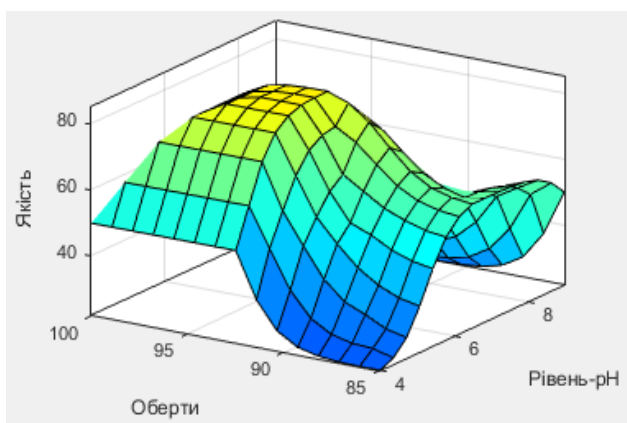


Рис. 6 – Поверхня відгуку значень рівня рН та кількості обертів валу двигуна міксера, що впливають на якість фаршу для крабових паличок

Похибка вимірювання ІВС, що розробляється складається із суми похибок окремих компонентів вимірювальних каналів і засобів обробки і відображення інформації. Похибки вимірювання виникають внаслідок дії похибок ПВП та АЦП при перетворенні безперервної у часі величини на квантовано-дискретну. Похибка обробки інформації мікроконтролером і похибка відображення інформації ЦВП є набагато меншою за похибки ПВП і АЦП, тому їх не враховуємо при побудові розрахункової формули. Таким чином, оскільки число складових сумарної похибки не перевищує дві, то формула сумарної похибки з урахуванням [11] приймає вигляд

$$\delta_{\Sigma} = 1,12 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \delta_i^2},$$

де N – кількість складових загальної похибки; δ_i – значення складової сумарної похибки; $k_{0,95} = 1,12$ – коефіцієнт, що залежить від довірчої ймовірності ($P = 0,95$) та числа складових сумарною похибки (дві складові) [11].

Похибка обраного для системи датчика температури DS18B20-3M-TUBE-IP67 у діапазоні: -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$ становить $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Похибка обраного для системи контролю датчика тиску пару на парових барабанах DMP 3331 становить $\pm 0,1\%$.

Похибка обраного датчика рівню рН Д (рН) П-02 М становить $\pm 1,0\%$ рН.

Похибка обраного датчика контролю кількості обертів валу двигуна AZ39148 John Deere оцінюється на рівні $\pm 1,0\%$.

Похибка убудованого у ATmega16 АЦП становить $0,1\%$.

Сумарна похибка каналу вимірювання тиску пару на парових барабанах

$$\delta_{\Sigma_1} = \pm 1,12 \cdot \sqrt{0,1^2 + 0,1^2} = \pm 0,16\%.$$

Сумарна похибка каналу вимірювання рівню рН

$$\delta_{\Sigma_2} = \pm 1,12 \cdot \sqrt{1,0^2 + 0,1^2} = \pm 1,13\%.$$

Сумарна похибка каналу вимірювання кількості обертів валу двигуна

$$\delta_{\Sigma_3} = \pm 1,12 \cdot \sqrt{1,0^2 + 0,1^2} = \pm 1,13\%.$$

Розрахунки сумарних похибок вимірювальних каналів ІВС довели, що жодна з похибок вимірювальних каналів не виходить за встановлене у технічному завданні значення в $1,5\%$.

Висновки

У роботі представлено структурну схему та опис роботи системи контролю виробництва крабових паличок. За допомогою графічного інтерфейсу користувача системи *fuzzy logic* побудовано систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити факторний вплив на якість фаршу для крабових паличок з боку температури у міксері, рівню рН та кількості обертів валу двигуна міксера. Встановлено, що підтримка параметрів технологічного процесу у середині робочого діапазону дає можливість отримати найвищу якість фаршу для крабових паличок. Найвища якість фаршу для крабових паличок отримана при температурі $22,5^{\circ}\text{C}$, рівню рН – $6,5\%$, кількості обертів валу двигуна міксера – $92,5$ об/хв.

Список літератури

1. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. *Інформаційно-вимірвальні технології та системи: навч. пос.* Харків. Видавництво «Факт», 2023. 254 с.
2. Manasi Natu, Supriya Rajankar, Omprakash Rajankar, Vrushali Raut. Industrial measurement system with LoRa interface. *J Integr Sci Technol.* 2023. vol. 12, no. 4. P. 783. doi: 10.62110/sciencein.jist.2024.v12.783.
3. Mun S., Shin E.-C., Kim S., Park J., Jeong C., Boo C.-G., Yu D., Sim J.-H., Ji C.-I., Nam T.-J., et al. Comparison of Imitation Crab Sticks with Real Snow Crab (*Chionoecetes opilio*) Leg Meat Based on Physicochemical and Sensory Characteristics. *Foods.* 2022. 11(10). P. 1381. doi: 10.3390/foods1110138.
4. Hasan M. R., Abdullah C. A. C., Mustapha N. A., Ghazali M. S. M., and Noranizan M. Gelling characteristics of fish surimi gel added with calciumhydroxyapatite (HAp). *5th International Symposium on Marine and Fisheries Research. OP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2023. 1289(1). P. 012025. doi: 10.1088/1755-1315/1289/1/012025.
5. Kanoksirirujisaya N. Reducing waste in frozen crab stick product inspection process by applying ECRS technique. *International Journal of Health Sciences.* 2022. 6(S4). P. 1506–1523. doi: 10.53730/ijhs.v6nS4.6236.
6. ДСТУ 5097:2008 Продукція із сурімі імітована. Технічні умови. Чинний від 01.07.2009.
7. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. Розробка та дослідження системи контролю параметрів середовища штучної екосистеми апаратом fuzzy-logic. *Сучасні інформаційні системи.* НТУ «ХПІ». 2021. Том. 5. № 4. С. 49-54. doi: 10.20998/2522-9052.2021.4.07.
8. Hrihorenko I., Drozdova T., Hrihorenko S., Tverytnykova E. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services. *Advanced information system.* National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2018. Vol. 3, № 4. P. 118-125. doi: 10.20998/2522-9052.2019.4.18.
9. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Опришкін О. С. Розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для другого рівня інформаційно-вимірвальної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 24-34. doi: 10.20998/2413-4295.2022.04.04.
10. Bashi A. Control System with Fuzzy Logic. *Control System with Fuzzy Logic.* Zenodo, Turkey, February. 09, 2024. doi: 10.5281/zenodo.10640837.

11. Чинков В. М. *Основи метрології та вимірвальної техніки.* Харків: НТУ «ХПІ», 2005. 524 с.

References (transliterated)

1. Hryhorenko I. V., Kondrashov S. I., Hryhorenko S. M. *Informatsiyno-vymiryvalni tekhnolohiyi ta systemy: navch.pos.* Kharkiv. Vydavnytstvo «Fakt», 2023. 254.
2. Mun S., Shin E.-C., Kim S., Park J., Jeong C., Boo C.-G., Yu D., Sim J.-H., Ji C.-I., Nam T.-J., et al. Comparison of Imitation Crab Sticks with Real Snow Crab (*Chionoecetes opilio*) Leg Meat Based on Physicochemical and Sensory Characteristics. *Foods,* 2022, 11(10), pp. 1381, doi: 10.3390/foods1110138.
3. Hasan M. R., Abdullah C. A. C., Mustapha N. A., Ghazali M. S. M., and Noranizan M. Gelling characteristics of fish surimi gel added with calciumhydroxyapatite (HAp). *5th International Symposium on Marine and Fisheries Research. OP Conf. Series: Earth and Environmental Science,* 2023, 1289(1), pp. 012025, doi: 10.1088/1755-1315/1289/1/012025.
4. Kanoksirirujisaya N. Reducing waste in frozen crab stick product inspection process by applying ECRS technique. *International Journal of Health Sciences,* 2022, 6(S4), pp. 1506–1523, doi: 10.53730/ijhs.v6nS4.6236.
5. Manasi Natu, Supriya Rajankar, Omprakash Rajankar, Vrushali Raut. Industrial measurement system with LoRa interface, *J Integr Sci Technol,* 2023, vol. 12, no. 4, p. 783, doi: 10.62110 / sciencein.jist.2024.v12.783.
6. DSTU 5097:2008 Produktsiya iz surimi imitovana. Tekhnichni umovy. Chynnyy vid 01.07.2009.
7. Hryhorenko I. V., Kondrashov S. I., Hryhorenko S. M. Rozrobka ta doslidzhennya systemy kontrolyu parametriv seredovyshcha shtuchnoyi ekosystemy aparamotom fuzzy-logic. *Suchasni informatsiyni systemy,* NTU «KhPI», 2021, Tom. 5, 4, pp. 49-54, doi: 10.20998/2522-9052.2021.4.07.
8. Hrihorenko I., Drozdova T., Hrihorenko S., Tverytnykova E. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services. *Advanced information system,* National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2018, Vol. 3, 4, pp. 118-125, doi: 10.20998/2522-9052.2019.4.18.
9. Kondrashov S., Hryhorenko I., Opryshkin O. Development of a situation system with fuzzy logic for the second level of the information and measurement system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4 (14), pp. 24-34, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.04.
10. Bashi A. Control System with Fuzzy Logic. *Control System with Fuzzy Logic.* Zenodo, Turkey, February. 09, 2024, doi: 10.5281/zenodo.10640837.
11. Chynkov V. M. *Osnovy metrolohii ta vymiryvalnoi tekhniki.* Kharkiv. NTU «KhPI», 2005. 524 p.

Відомості про авторів (About authors)

Ігор Володимирович Григоренко – кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірвальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4905-3053; e-mail: grigmaestro@gmail.com.

Ihor Hryhorenko – PhD, Professor of the Department of information and measuring technologies and systems National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4905-3053; e-mail: grigmaestro@gmail.com.

Григоренко Світлана Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: 0000-0003-0150-4844; e-mail: sngloba@gmail.com.

Svitlana Hryhorenko - PhD, Associate Professor Department of computer and radio-electronic control systems and diagnostics National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0150-4844; e-mail: sngloba@gmail.com.

Андренко Дмитро Олександрович – магістр-науковець кафедри комп'ютерних та радіоелектронних систем контролю та діагностики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e-mail: dmytro.andrenko@infiz.khpi.edu.ua

Dmytro Andrenko – master of the Department of computer and radio-electronic control systems and diagnostics National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: dmytro.andrenko@infiz.khpi.edu.ua

Кубрик Борис Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичні основи електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-8327-0350; e-mail: borys.kubryk@khpi.edu.ua.

Boris Kubrik - PhD, Associate Professor Department of Theoretical foundations of electrical engineering National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0002-8327-0350; e-mail: borys.kubryk@khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Григоренко І. В., Григоренко С. М., Андренко Д. О., Кубрик Б. І. Система контролю технології виробництва крабових паличок з нечіткою логікою. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 42-48. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.06.

Please cite this article as:

Hryhorenko I., Hryhorenko S., Andrenko D., Kubrik B. Technology control system for crab stick vibration with fuzzy logic. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1 (19), pp. 42-48, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.06.

*Надійшла (received) 22.02.2024
Прийнята (accepted) 21.03.2024*

УДК 641-026.7:[613.292:634.42]:640.432

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.07

СТРУКТУРНО–МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МУСУ З ФЕЙХОА

І. М. КАЛУГІНА*, С. О. ПОПЛАВСЬКА

кафедра технології ресторанного і оздоровчого харчування, Одеський національний технологічний університет,
м. Одеса, УКРАЇНА

*email: ik101273@gmail.com

АНОТАЦІЯ Досліджуються структурно-механічні властивості десертних мас для наукового обґрунтування технології мусу з дієтичною добавкою фейхоа для закладів ресторанного господарства. У роботі показана доцільність використання нової дієтичної добавки – пюре фейхоа з цукром для підвищення харчової цінності збитих десертів, таких як мус і поліпшення їх технологічних властивостей. Розроблено нову дієтичну добавку – пюре фейхоа з цукром, яка характеризується високим вмістом цінних нутрієнтів, у тому числі йоду (60,1 мкг/100 г), що становить 40 % від рекомендованої добової норми. Вивчено реологічні властивості десертних мас з фейхоа. Встановлено, що досліджувані зразки мусу з фейхоа характеризуються досить високим ступенем структурування, а, отже, і найбільшою в'язкістю в області малої напруги зсуву від 1,8 до 5,4 с⁻¹. При швидкості зсуву від 9 с⁻¹ й вище відбувається руйнування просторового каркасу досліджуваних систем. Визначено, що з додаванням фейхоа у десертні маси дещо збільшується їх ефективна в'язкість та густина, без зниження показників піноутворюючої здатності. На підставі аналізу мікроструктури зразків підтверджено, що введення у мус 20 % добавки фейхоа сприяє підвищенню дисперсності десертної маси, утворенню рівномірно розподілених та однорідних за розмірами (40...60 мкм) повітряних бульбашок, а отже покращенню консистенції готового продукту. Встановлено, що оптимальним вмістом дієтичної добавки – пюре фейхоа з цукром у рецептурі мусу є 20 % до маси готового продукту. Визначені раціональні технологічні параметри приготування мусу з фейхоа на стадії збивання, а саме: тривалість збивання (6)·60 с, градієнт швидкості зсуву від 3 до 5,4 с⁻¹ за температур 35...40 °С. При цих режимах технологічної обробки та вмісті дієтичної добавки фейхоа отримано мус з найвищим показником піноутворюючої здатності (253 %), найбільш збитої, пишної та дрібнодисперсної структури, а отже, з поліпшеними характеристиками консистенції.

Ключові слова: мус; фейхоа; структурно-механічні властивості; в'язкість; густина; піноутворююча здатність; мікроструктура; заклади ресторанного господарства.

STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FEIJOA MOUSSE

I. KALUGINA, S. POPLAVSKA

Department of restaurant and healthy food technologies, Odesa National University of Technology, Odesa, UKRAINE

ABSTRACT The study of the structural and mechanical properties of dessert masses for the scientific substantiation of the technology of mousse with feijoa dietary supplement for the restaurant establishments is conducted. The work shows the expediency of using a new dietary supplement – feijoa puree with sugar to increase the nutritional value of whipped desserts, such as mousse, and improve their technological properties. A new dietary supplement has been developed – feijoa puree with sugar, which is characterized by a high content of valuable nutrients, including iodine (60.1 μg/100 g), which is 40 % of the recommended daily allowance. The rheological properties of feijoa dessert masses were studied. It was established that the studied samples of feijoa mousse are characterized by a fairly high degree of structuring, and, therefore, the highest viscosity in the region of low shear stress from 1.8 to 5.4 s⁻¹. At a shear rate of 9 s⁻¹ and higher, the spatial framework of the studied systems is destroyed. It was determined that with the addition of feijoa to dessert masses, their effective viscosity and density increase slightly, without reducing the indicators of foaming ability. Based on the analysis of the microstructure of the samples, it was confirmed that the introduction of 20 % feijoa additive into the mousse helps to increase the dispersion of the dessert mass, the formation of evenly distributed and homogeneous air bubbles (40...60 microns), and therefore to improve the consistency of the finished product. It was established that the optimal content of dietary supplement - feijoa puree with sugar in the mousse recipe is 20 % of the weight of the finished product. Rational technological parameters for the preparation of feijoa mousse at the whipping stage are defined, namely: whipping duration (6)·60 s, gradient of shear rate from 3 to 5.4 s⁻¹ at temperatures of 35...40 °C. With these modes of technological processing and the content of feijoa dietary supplement, a mousse with the highest foaming capacity (253 %), the most whipped, lush and finely dispersed structure was obtained.

Keywords: mousse; feijoa; structural and mechanical properties; viscosity; density; foaming ability; microstructure; restaurant establishments.

Вступ

Сучасні тенденції розвитку ресторанного ринку свідчать про стрімке зростання попиту серед

споживачів на збиті десерти, такі як мус, сорбет, суфле тощо. Особлива увага в наш час приділяється «здоровим» десертам з підвищеною харчовою цінністю [1-4]. Однак, наявний асортимент такої

десертної продукції у закладах ресторанного господарства є обмеженим, отже попит на ці страви задоволений не повністю. Розширення асортименту, підвищення якості та харчової цінності збитих десертів, у тому числі мусу, доцільно проводити шляхом введення в їх рецептури дієтичних добавок з нової плодово-ягідної сировини, такої як фейхоа, до складу якої входять цінні біологічно-активні речовини та структуроутворюючі сполуки.

Слід відмітити, що структурно-механічні властивості десертних мас (ефективна в'язкість, піноутворююча здатність, густина та дисперсність) характеризують якість збитих десертів і враховуються споживачем при їх виборі з широкого асортименту продукції [5]. Одним із важливих критеріїв у виробництві мусу є дотримання чітко визначених параметрів технологічного процесу, так як від цього залежить якість готового продукту. Тому, для управління якістю готової продукції необхідні дані про структурно-механічні властивості збитих десертних мас на різних технологічних стадіях їх виробництва.

Отже, для розробки технології мусу з використанням дієтичних добавок з нової плодово-ягідної сировини необхідно враховувати їх вплив на структурно-механічні характеристики десертних мас, які визначають їхню технологічність, текстуру, якість та конкурентоспроможність отриманої продукції.

У зв'язку з цим, використання нових видів сировини, а саме фейхоа для підвищення харчової цінності збитих десертів, таких як мус, вдосконалення технології та підбір раціональних параметрів процесу їх виробництва, які дозволять скоротити витрати при одночасному поліпшенні якості і розширенні асортименту є актуальним завданням, яке потребує вирішення.

Мета роботи

Метою роботи є наукове обґрунтування технології мусу з дієтичною добавкою фейхоа для закладів ресторанного господарства.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити вплив дієтичної добавки фейхоа на структурно-механічні властивості десертних мас, а саме: ефективну в'язкість, піноутворюючу здатність та густину;
- вивчити мікроструктуру мусу з фейхоа;
- визначити оптимальний вміст добавки пюре фейхоа з цукром у рецептурі мусу;
- встановити раціональні технологічні параметри приготування мусу з фейхоа на стадії збивання.

Матеріали і методи. Для виробництва нових дієтичних добавок використовували ягоди фейхоа сорту «Андре», які відповідали вимогам ДСТУ

4640:2006 [6]. У розробці рецептурної композиції й технології мусу з фейхоа в якості прототипу було обрано рецептуру солодкої страви № 965 «Мус лимонний» [7], який готували з цукро-желейного сиропу з додаванням лимонного соку за класичною технологією. Були розроблені рецептурні композиції мусу, які містили пюре фейхоа з цукром в кількості: 15 %, 20 % та 25 % до маси готового продукту. Дослідження структурно-механічних (реологічних) властивостей десертних мас були проведені на ротаційному віскозиметрі «Реотест-2». Ротаційний метод [8, 9] ґрунтується на вимірюванні в'язкості матеріалу, який поміщають між двома одновідносними поверхнями й піддають деформації зсуву. Піноутворюючу здатність (ПЗ) десертів визначали методом Лур'є, заснованим на вимірі маси фіксованого об'єму суміші до збивання і того ж об'єму суміші, насиченої повітрям після збивання та проведенні розрахунку піноутворюючої здатності мусу, виражене у відсотках [10]. Дослідження мікроструктури зразків мусу проводили з використанням портативного мікроскопу «Celestron Deluxe» методом прямого визначення розмірів повітряних бульбашок за допомогою програми AMCap з подальшою фотографією в програмі Bandicam. Фотозйомку вели в світлі при збільшенні в 700 разів [11].

Виклад основного матеріалу

Одним із шляхів збагачення харчового раціону населення України є інтродукція багатих на біологічно активні речовини плодів екзотичних рослин, їх акліматизація у нових регіонах та розробка продуктів харчування на їх основі. Такою зимостійкою субтропічною рослиною, яка сьогодні успішно вирощується на відкритому ґрунті в південних областях України є фейхоа.

Ягоди фейхоа володіють не тільки чудовим смаком і свіжим ароматом – за сукупністю корисних для людини властивостей вони відносяться до найбільш цінних рослин. Харчова цінність ягід фейхоа визначається вмістом в них широкого спектру біологічно активних речовин. Ці ягоди багаті вітамінами С (32...40 мг/100 г), групи В, Р, Е, органічними кислотами, мінеральними елементами, зокрема фосфором, залізом, калієм і йодом, що дозволяє віднести їх до продуктів з високою харчовою цінністю та профілактичними властивостями [12-14]. Так, вміст йоду в ягодах фейхоа становить 70...100 мкг/100 г [13, 15], у той час як добова потреба в йоді у дорослого населення не залежно від віку і статі становить 150 мкг [16]. Отже, використання у рецептурах страв ягід фейхоа, які містять у своєму складі значну кількість йоду, дозволить ефективно вирішити проблему йододефіциту й пов'язаних з цим захворювань щитоподібної залози. Вживання фейхоа знижує ризик

гіпертензії, адже ці ягоди багаті калієм (172 мг/100 г) при низькому вмісті натрію (3 мг/100 г) [17]. Шкірка фейхоа містить ефірні олії [18] та антиоксиданти [19, 20]. Як відомо, несприятливі зовнішні фактори, такі як: вплив радіації, інфекційні захворювання, стреси, куріння, можуть призводити до зниження роботи антиоксидантної системи організму і підвищення ризику різних захворювань. В той час, зменшити шкідливий вплив на організм вільних радикалів дозволяє систематичне вживання натуральних рослинних продуктів з високим вмістом антиоксидантів, таких як фейхоа. Відомі дані про антибактеріальний ефект фейхоа, завдяки високому вмісту фенольних сполук [21, 22]. Протигрибкова дія фейхоа обумовлена наявністю поліфенолів, флавоноїдів та ефірних олій [23]. Ягоди фейхоа характеризуються високим вмістом пектину (1,5...2,5 г/100 г) [24]. Відомо, що пектин володіє сорбційною здатністю й сприяє виведенню токсинів, солей важких металів та радіонуклідів із організму людини, має антиоксидантну дію й, завдяки цьому, широко застосовується у створенні харчових продуктів профілактичного призначення [25, 26]. Структуроутворюючі властивості пектину, який міститься у фейхоа робить цю сировину перспективною для виготовлення структурованих десертів, таких як муси.

Отже, використання фейхоа в технології мусу не тільки підвищить його харчову цінність, надасть профілактичні властивості, але й дозволить впливати на процеси формування структури цього збитого десерту.

Сезонність збирання та реалізації ягід фейхоа (жовтень – початок грудня) обумовлює необхідність їх переробки з метою подальшої заготівлі для можливості використання цієї цінної сировини закладами ресторанного господарства у технологіях страв протягом року. Розроблений спосіб виробництва пюре фейхоа з цукром [27], який включає протирання ягід із цукром на здвоєній протиральній машині через сита з діаметрами 1,2 та 0,4 мм. Завдяки застосуванню здвоєної протиральної машини маса проходить стадію фінішування з видаленням грубих частинок. Отриману масу розфасовують у скляну тару, закупорюють й маркують. Готове пюре фейхоа з цукром зберігають за температур 3...5 °С протягом 6 місяців. Цей спосіб дозволяє отримати пюре із суцільних ягід фейхоа зі шкіркою, а отже продукт з підвищеною харчовою цінністю. Так, у шкірці плоду містяться кахетини і лейкоантоціани, ефірні олії, які є потужними антиоксидантами і імуномодуляторами [19]. Маса пюре фейхоа з цукром не піддається тепловій обробці, що забезпечує максимальне збереження біологічно активних речовин, в тому числі нетермостійких сполук йоду. Так, пюре фейхоа з цукром характеризується високим вмістом цінних нутрієнтів, у тому числі йоду (60,1 мкг/100 г), що

становить 40 % від рекомендованої добової норми [27].

Пюре фейхоа з цукром пропонується використовувати як дієтичну добавку в технології десертів підвищеної харчової цінності, таких як мус. Як основу для розробки композиції інгредієнтів мусу з фейхоа прийняли рецептуру солодкої страви № 965 «Мус лимонний», із рецептури якої виключали лимони та цукор, замінюючи ці інгредієнти на пюре фейхоа з цукром. Для дослідження обрано чотири зразки: контрольний зразок – мус лимонний; муси з різним вмістом фейхоа, а саме: 15 %, 20 % та 25 % до маси продукту.

Обговорення результатів

Важливою структурно-механічною (реологічною) характеристикою десертних мас, що впливає на перебіг технологічного процесу та визначає її поведінку на стадії збивання мусу, є її в'язкість. Цей показник, обумовлений силами зчеплення між молекулами, що характеризує опірність маси її течії під дією зовнішніх сил і залежить від багатьох факторів, таких як вміст сухих речовин, склад та співвідношення рецептурних компонентів, температура та ін. [28]. У зв'язку з цим вивчено вплив зміни рецептурного складу мусу на в'язкість досліджуваних зразків.

Оскільки температура це фактор, який в найбільшій мірі впливає на плинність термічно нестійких десертних мас, то температурні режими вивчення в'язкості обрані відповідно до технологічних параметрів процесу збивання мусу, а саме при температурі 35...40 °С.

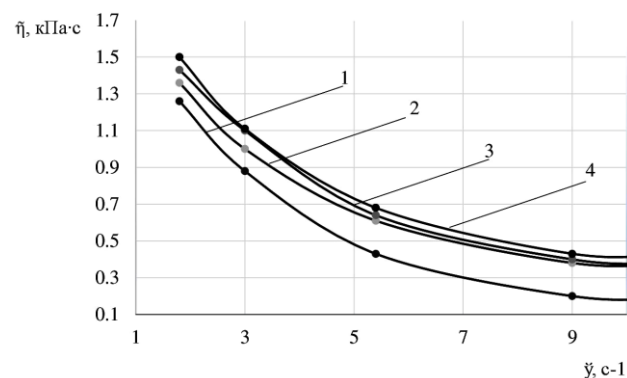


Рис. 1 – Залежність ефективної в'язкості η , кПа·с мусу від швидкості зсуву γ , с⁻¹ та кількості добавки фейхоа
1 – контроль; 2 – мус, 15 % фейхоа; 3 – мус, 20 % фейхоа; 4 – мус, 25 % фейхоа

Результати дослідження залежності ефективної в'язкості мусу від швидкості зсуву (рис. 1) показали, що характер реограм свідчить про псевдопластичність всіх досліджуваних зразків десертних мас, в'язкість

яких є характеристикою рівноважного стану між процесом руйнування та відновлення. Як контрольний, так і досліджувані зразки мусу характеризуються досить високим ступенем структурування, а, отже, і найбільшою в'язкістю в області малої напруги зсуву від 1,8 до 5,4 с⁻¹. У міру збільшення швидкості зсуву внаслідок руйнування структури десертних мас спостерігається перехід від стадії течії до руйнування. При швидкості зсуву від 9 с⁻¹ й вище відбувається руйнування просторового каркасу досліджуваної системи.

Встановлено, що з додаванням добавок фейхоа у десертні маси збільшується їх ефективна в'язкість. Так, при градієнті швидкості зсуву 1,8 с⁻¹ ефективна в'язкість у контрольному зразку мусу складала 1,262 кПа·с, а у зразках мусу з добавками фейхоа у кількості 15, 20 та 25 % відповідно – 1,371, 1,453 та 1,504 кПа·с. Такий характер змінення значень ефективної в'язкості мусу з додаванням фейхоа можна пояснити різною енергією зв'язку частинок у коагуляційних контактах, яка залежить від природи речовини дисперсної фази й дисперсійного середовища, енергетичних умов коагуляції [29]. Збільшення ефективної в'язкості мусу із фейхоа, по перше, може бути пояснена природою дисперсної фази, а саме добавки з фейхоа, яка характеризується неоднорідністю частинок структури: розмір частинок в пюре фейхоа з цукром коливається в межах від 0,1...0,4 мм.

По-друге, зростання ефективної в'язкості мусу з фейхоа може бути обумовлено тим, що при додаванні добавки фейхоа у масу вносяться сухі речовини, отже вологість продукту знижується. Як бачимо з рис. 2, вологість контрольного зразка мусу становить 32,8 % і зменшується при додаванні добавки фейхоа у кількості 15, 20 та 25 % відповідно до 29,1; 26,7 та 26,2 %. Крім того, із введенням добавки фейхоа у мус вносяться пектини, які є гідроколоїдами і утворюють в'язкі розчини [30].

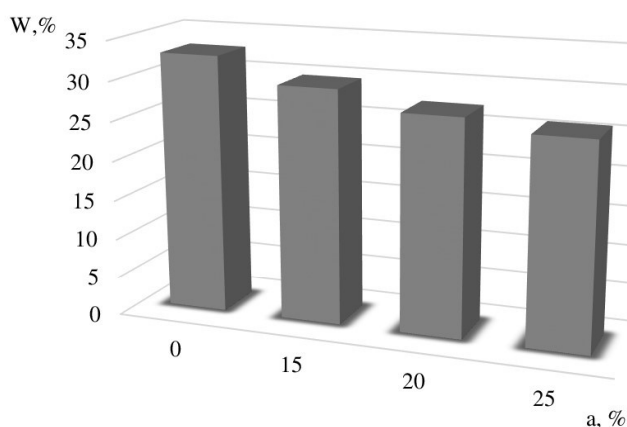


Рис. 2 – Вологість W , % мусу з фейхоа
1 – контроль; 2 – мус, 15 % фейхоа; 3 – мус, 20 % фейхоа; 4 – мус, 25 % фейхоа

Під час реологічних досліджень важливе значення має отримання кривих плинину, які характеризують властивості плинину харчових мас під час зсуву. Приведені на рис. 3 криві плинину мусу з фейхоа свідчать про те, що з підвищенням швидкості зсуву напруга зсуву зростає як для мусу з добавками фейхоа, так і без них. Як видно з рис. 3, залежність напругу зсуву від швидкості зсуву має нелінійний характер, отже, досліджувані десертні маси відносяться до структурованих (неньютонівських) рідин. Аномалія в'язкості таких систем пов'язана зі структурою рідини та її змінами під час течії: при малих швидкостях зсуву структура руйнується й повністю відновлюється, з підвищенням швидкості, руйнування структури починає переважати над відновленням – структура повністю руйнується [31].

На підставі отриманих даних (рис. 2, 3) можна зробити висновок, що для отримання структурованої консистенції мусу з фейхоа буде ефективним проводити процес збивання в областях градієнту швидкості зсуву від 3 до 5,4 с⁻¹, при яких не відбувається руйнування структури цього десерту.

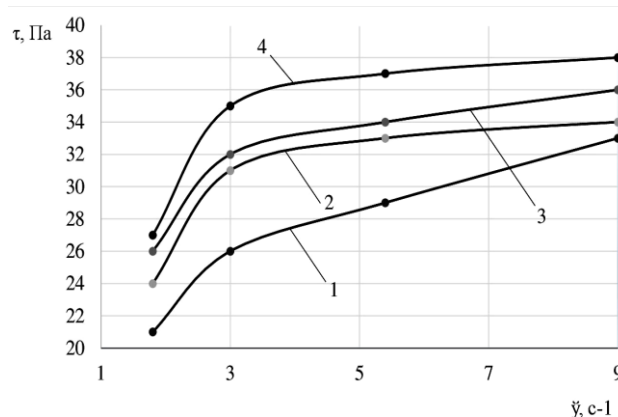


Рис. 3 – Криві плинину мусу
1 – контроль; 2 – мус, 15 % фейхоа; 3 – мус, 20 % фейхоа; 4 – мус, 25 % фейхоа

Однією з основних вимог під час виробництва мусу є забезпечення заданої консистенції, від якої багато в чому залежить позитивне сприйняття споживачем харчового продукту [3]. Консистенція є складним показником, що входить у систему органолептичної оцінки якості харчових виробів. Вона визначається комплексом об'єктивних структурно-механічних характеристик продуктів, в тому числі, – густиною, піноутворюючою здатністю [5].

Тому, для визначення технологічних параметрів та режимів виробництва мусу досліджено вплив дієтичної добавки фейхоа та тривалості збивання на піноутворюючу здатність (рис. 4) та густину мусу (рис. 5).

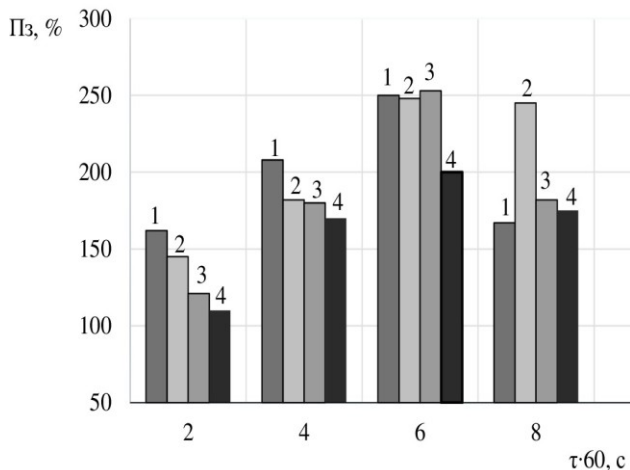


Рис. 4 – Залежність піноутворюючої здатності P_z , % мусу з фейхоа від тривалості збивання τ , 60, с та кількості добавки фейхоа та кількості добавки фейхоа
1 – контроль; 2 – мус, 15 % фейхоа; 3 – мус, 20 % фейхоа; 4 – мус, 25 % фейхоа

Для отримання пишної, насиченої повітрям консистенції десертну масу збивали при таких режимах: температура маси 35...40 °С; тривалість збивання – (2...8)·60 с; швидкість обертання робочого органу збивальної машини – 400...500 об/хв.

У початковий період збивання одночасно протікають процеси утворення та поділу бульбашок, система інтенсивна насичується повітрям. Це призводить до збільшення об'ємної концентрації повітря, зростання піноутворюючої здатності (рис. 4) та зниження густини досліджуваних мас до мінімальних значень (рис. 5).

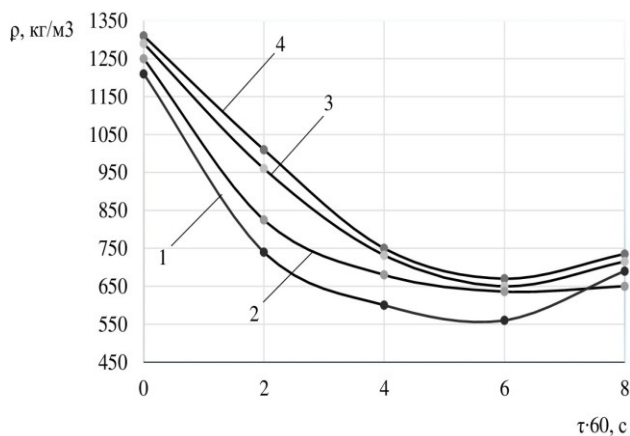


Рис. 5 – Залежність густини ρ , кг/м³ мусу від тривалості збивання τ , 60, с та кількості добавки фейхоа
1 – контроль; 2 – мус, 15 % фейхоа; 3 – мус, 20 % фейхоа; 4 – мус, 25 % фейхоа

Унаслідок аналізу експериментальних даних встановлено, що загальною тенденцією для досліджуваних модельних систем є підвищення піноутворюючої здатності та зниження густини зразків мусу під час збивання протягом (1...6)·60 с. Так, при збиванні дослідних зразків мусу на протязі (6)·60с піноутворююча здатність збільшується для контрольного зразка з 162 % до 250 %, тобто у 1,54 рази, для зразків мусу з 15, 20 та 25 % добавки фейхоа відповідно у 1,7; 2,1 та 1,8 рази. Об'ємна концентрація повітря, досягнувши максимального значення, незначний час залишається постійною. Подальше збивання на протязі (8)·60 с призводить до зменшення обсягу піни та збільшення густини, що свідчить про руйнування структури мас. Це є підґрунтям для рекомендації раціональної тривалості збивання – (6)·60 с. При цьому абсолютні значення піноутворюючої здатності дослідних зразків мусу є найвищими.

Висока в'язкість вихідної суміші для зразків з добавками фейхоа (рис. 1), обтяжуючи плівковий каркас, дещо ускладнює процес насичення маси повітрям [14]. Внаслідок цього, густина зразків мусу з добавками фейхоа у кількості 15, 20 та 25 % при тривалості збивання (6)·60 с дещо вище у порівнянні з контролем (560 кг/м³) і складала 636 кг/м³, 650 кг/м³ та 670 кг/м³ відповідно. При приготуванні мусу з 25 % фейхоа піноутворююча здатність маси низька, що свідчить про недостатню насиченість цього десерту бульбашками повітря та відповідно забиту структуру. Найкращий показник піноутворюючої здатності (253 %) досягається при приготуванні мусу з додаванням 20 % фейхоа, який може бути рекомендованим для впровадження у заклади ресторанного господарства.

Важливим показником збитих десертів, таких як мус є дисперсність піни, яка забезпечує необхідну стабільність харчової текстури у часі [5]. Піноподібні системи, до яких належать збиті десерти, характеризуються розміром та концентрацією повітряної фракції. Нами проведені дослідження й ідентифікація розміру та кількості повітряних бульбашок у зразках мусу. Результати мікроскопічних досліджень представлені на рис. 6.

На мікрофотографіях (рис. 6) видно, що в досліджуваних мікроструктурах повітряні бульбашки ідентифікуються у вигляді ідеально сферичних форм, які розподілені за об'ємом. Причому, введення у мус дієтичної добавки фейхоа сприяє утворенню більш дрібних повітряних бульбашок і більш рівномірному розподілу їх по всьому об'єму збитої маси в порівнянні з контролем.

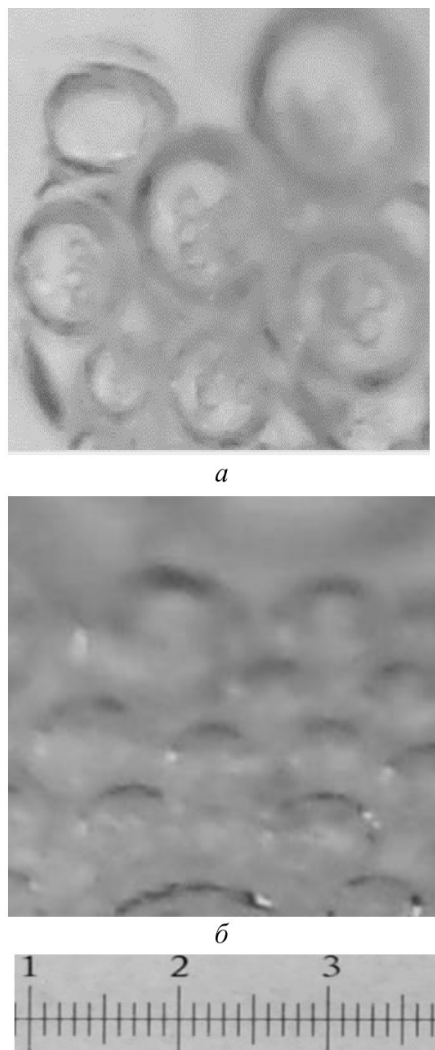


Рис. 6 – Мікрофотографії структури мусу з фейхоа
а – контроль; б – мус, 20 % фейхоа

Повітряні бульбашки в контрольному зразку мусу (рис. 6 (а)) неоднорідні за розмірами (від 10 до 100 мкм) та розподілені нерівномірно. Встановлено, що середній розмір повітряних бульбашок у мусі з 20 % фейхоа (рис. 6 (б)) становить 40...60 мкм, відповідно. В цьому зразку мусу бульбашки повітря розподілені більш рівномірно. Відомо, що чим менші розміри частинок, тим більша дисперсність системи [32]. Отже, мус з використанням дієтичної добавки фейхоа має більшу дисперсність порівняно з контрольними зразком. Звісно, що високі органолептичні показники визначаються у мусі з дрібнодисперсною структурою [33]. Аналізуючи дані мікроструктури досліджуваних зразків мусу, можна зробити висновок, що для отримання найбільш пишної, дрібнодисперсної структури збитого десерту з рівномірно розподіленими та однорідними за розмірами повітряними бульбашками доцільним є додавання до рецептури мусу 20 % пюре з фейхоа з цукром.

Висновки

Результати досліджень свідчать про перспективність та доцільність використання нової дієтичної добавки – пюре фейхоа з цукром у технології мусу підвищеної харчової цінності.

Аналіз структурно-механічних властивостей десертних мас показав, що всі досліджувані зразки мусу з різним вмістом дієтичної добавки фейхоа характеризуються досить високим ступенем структурування, а, отже, і найбільшою в'язкістю в області малої напруги зсуву від 1,8 до 5,4 с⁻¹. При швидкості зсуву від 9 с⁻¹ й вище відбувається руйнування просторового каркасу досліджуваних систем.

Характер отриманих реограм свідчить про псевдопластичність всіх досліджуваних зразків десертних мас, в'язкість яких є характеристикою рівноважного стану між процесом руйнування та відновлення. Залежність напругу зсуву від швидкості зсуву має нелінійний характер, отже, досліджувані десертні маси відносяться до структурованих (неньютонівських) рідин.

Визначено, що з додаванням дієтичних добавок фейхоа у десертні маси дещо збільшується їх ефективна в'язкість та густина, без зниження показників піноутворюючої здатності, а при додаванні 20 % пюре фейхоа з цукром піноутворююча здатність мусу навіть вища ніж у контрольному зразку.

Як показав аналіз мікроструктури зразків, введення у мус фейхоа сприяє підвищенню дисперсності десертної маси, утворенню рівномірно розподілених та однорідних за розмірами (40...60 мкм) повітряних бульбашок, а отже покращенню консистенції готового продукту.

Встановлені оптимальний вміст дієтичної добавки – пюре фейхоа з цукром у рецептурі мусу, а саме: 20 % до маси готового продукту. Рациональними технологічними параметрами приготування мусу з фейхоа на стадії збивання визначені такі: тривалість збивання (6)·60 с, градієнт швидкості зсуву від 3 до 5,4 с⁻¹ за температур 35...40 °С. При цих режимах технологічної обробки та вмісті дієтичної добавки фейхоа отримано мус з найвищим показником піноутворюючої здатності (253 %), найбільш пишної, дрібнодисперсної структури, а отже, з поліпшеними характеристиками консистенції.

Отримані дані дозволили обґрунтувати технологію мусу з дієтичною добавкою фейхоа. Розроблену технологію мусу з фейхоа можна рекомендувати до впровадження у виробництво закладів ресторанного господарства для розширення асортименту десертів підвищеної харчової цінності.

Список літератури

1. Michaitrakun S., Manokit R., Singkeaw K., Kamdaeng O. Enrichment of gamma-aminobutyric acid (GABA) content using germinated parboiled rice in Thai layered dessert

- (kanom chan) products. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. December 2023. Vol. 34. P. 100816. doi: 10.1016/j.ijgfs.2023.100816.
2. Антоненко А. В., Бровенко Т. В., Стукальська Н. М., Криворучко М. Ю. та ін. Технологія десертів функціонального призначення. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. № 5. С. 28–37. doi: 10.32851/tnv-tech.2022.5.4.
 3. Kurzer A., Wiriyaaphanich T., Cienfuegos C., Spang E., Guinard J. Exploring fruit's role in dessert: The Dessert Flip and its impact on university student acceptance and food waste. *Food Quality and Preference*. 2020. Vol. 83. P. 103917. doi: 10.1016/j.foodqual.2020.103917.
 4. Dzyuba N. A., Oliinyk M., Kalugina I. M., Poplavska S. A. Improving the technology of aeration of the food system of mousse at horeca enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 2. № 11 (122). P. 74–82. doi: 10.15587/1729-4061.2023.275615.
 5. Tsykhanovska I., Yevlash V., Alexandrov A., Khamitova B., Svidlo K. Forming the structure of whipped desserts when introducing the food additive "Magnetofood" to their formulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2. № 11 (98). P. 45–55. doi: 10.15587/1729-4061.2019.161855.
 6. ДСТУ 7183:2010. *Плоди субтропічних культур свіжі. Технічні умови*. Київ. 2010. 27 с.
 7. Здобнов О. І., Циганенко В. А. *Збірник рецептур страв та кулінарних виробів: Для підприємств громадського харчування*. Київ. ТОВ «Видавництво Арій», 2009. 680 с.
 8. Черевко О. І., Михайлов В. М., Маяк В. І., Маяк О. А. *Реологія в процесах виробництва харчових продуктів: навч. посібник: у 2 ч. Ч. 1. Класифікація та характеристика неньютонівських рідин*. Харків. ХДУХТ, 2014. 244 с.
 9. Anandha Rao M. *Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications*. Springer-Verlag US, 2007. 482 p. doi: 10.1007/978-0-387-70930-7.
 10. Черевко О. І., Поперечний А. М. *Процеси і апарати харчових виробництв: підручник. – 2-е видання, доп. та випр.* Харків. Світ Книг, 2014. 495 с.
 11. Говорун Т. П., Будник А. Ф., Юскаєв В. Б. *Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів: навч. посіб.* Суми. Сумський державний університет, 2014. 255 с.
 12. Fan Zhu. Chemical and biological properties of feijoa (*Acca sellowiana*). *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 81. P. 121–131. doi: 10.1016/j.tifs.2018.09.008.
 13. Pasquariello M. S., Mastrobuoni F. D. Agronomic, nutraceutical and molecular variability of feijoa. *Scientia Horticulturae*. 2015. № 191 (6). P. 1–9. doi: 10.1016/j.scienta.2015.04.036.
 14. Almeida J. Dos Santos Opuski De., Dias C. O., Arriola N. D.A., De Freitas B. S. M., De Francisco A., Petkowicz C. L. O. Feijoa (*Acca sellowiana*) peel flours: A source of dietary fibers and bioactive compounds. *Food Bioscience*. December 2020. Vol. 38. P. 100789. doi: 10.1016/j.fbio.2020.100789.
 15. Roderick J. W. Bio-active products from fruit of the feijoa. *Food Chemistry*. 2010. № 121 (4). P. 923–926. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.01.047.
 16. Верховна Рада України. *Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії*. НАКАЗ Міністерство охорони здоров'я України від 03.09.2017 р. 2017. № 1073. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17#Text> (дата звернення: 03.12.2023).
 17. Amer A. A., Elgohary R., Ibrahim F. M., Taha H. S. Anticoagulant effect of *Feijoa sellowiana* extracts generated by different biotechnological techniques. *Heliyon*. April 2023. Vol. 9 (4). P. 15444. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15444.
 18. Smeriglio A., Denaro M., De Francesco C., Cornara L., Barreca D. Feijoa Fruit Peel: Micro-morphological Features, Evaluation of Phytochemical Profile, and Biological Properties of Its Essential Oil. *Antioxidants*. 2019. № 8 (8). P. 320. doi: 10.3390/antiox8080320.
 19. Ielpo M. T. L., Basile A., Miranda R. Immunopharmacological properties of flavonoids. *Fitoterapia*. 2000. № 71 (1). P. 101–109. doi: 10.1016/S0367-326X(00)00184.
 20. Santos P. H., Kammers j. C., Silva A. P., Oliveira J. V., Hense H. Antioxidant and antibacterial compounds from feijoa leaf extracts obtained by pressurized liquid extraction and supercritical fluid extraction. *Food Chemistry*. May 2021. Vol. 344 (15). P. 128620. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128620.
 21. Cebi N., Sagdic O. Characterization of Feijoa sellowiana leaves based on volatile and phenolic compound compositions and antimicrobial properties. *Food Sci. Technol (Campinas)*. 2022. Vol. 42. P. 14221. doi: 10.1590/fst.14221.
 22. Basile A., Vuotto M. L., Violante U. Antibacterial activity in *Actinidia chinensis*, *Feijoa sellowiana* and *Aberia caffra*. *International Journal of Antimicrobial Agents*. 1997. № 8 (3). P. 199–203. doi: 10.1016/S0924-8579(97)00376-2.
 23. Fazli F., Babaei A., Nokhodchi F., Moazeni M., Fazli H., Nahvi N., Ebrahimnejad P. Biofabrication of silver nanoparticles with *Feijoa sellowiana* tailored by box-behken design: An eco-friendly approach to enhance antifungal properties in Children's toothpaste. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2024. P. 105361. doi: 10.1016/j.jddst.2024.105361.
 24. Zhu Z., Song X., Yao J., Li Z., Jiang Yu., Yu Q., Huang Z., Liu H. Structural characteristics, functional properties, antioxidant and hypoglycemic activities of pectins from feijoa (*Acca sellowiana*) peel. *Food Chemistry*. 2023. Vol. 428. P. 136819. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136819.
 25. Liu J., Wang T., Huang B., Zhuang Yu., Hu Yo., Fei P. Pectin modified with phenolic acids: Evaluation of their emulsification properties, antioxidation activities, and antibacterial activities. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. Vol. 174. P. 485–493. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.01.190.
 26. Farzaliyev E. B., Okten S. Production and characterization of fruit jam with activated pectin using wild hawthorn puree (*Crataegus monogyna Jacq.*). *Natural Product Research*. 2023. doi: 10.1080/14786419.2023.2283760.
 27. Калугіна І. М., Дзюба Н. А., Дубина А. А. Технологія солодких страв із використанням дієтичних добавок для закладів ресторанного господарства. *Ресторанний і готельний консалтинг. Інновації*. 2023. Т. 6. № 1. С. 110–124. doi: 10.31866/2616-468.6.1.2023.278475.
 28. Iorgacheva E. G., Makarova O. V., Avetisyan K. V. Regulation of structural and rheological properties of jelly and whipped masses for two-layer marmalade. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 2. № 12 (68). P. 122–127. doi: 10.15587/1729-4061.2014.23380.
 29. Goralchuk A., Grinchenko O., Riabets O., Kotlyar O. Food dispersion systems process stabilization. A review. *Ukrainian Food Journal*. 2019. № 8 (4). P. 699–732. doi: 10.24263/2304-974X-2019-8-4-4.

30. Sokolovska I. O., Kambulova J. V., Overchuk N. O. Study of the water binding in the gel systems of pectin and sodium alginate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2. № 11 (80). P. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65746.
 31. Ofoli R. Y., Morgan R. G., Steffe J. F. A generalized rheological model for inelastic fluid foods. *Journal of Texture Studies*. 2007. № 18 (3). P. 213–230. doi: 10.1111/j.1745-4603.1987.tb00899.x.
 32. Cerbelaud M., Mortier F., Semaan H., Gerhards J., Crespin B., Ferrando R., Videcoq A. Numerical study of the effect of particle size dispersion on order within colloidal assemblies. *Materialstoday Communications*. 2024. Vol. 38. P. 107973. doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107973.
 33. Архіпов В. В. *Ресторанна справа: Асортимент, технологія, управління якості продукції у сучасному ресторані. 3-тє вид. навч. посіб.* К. «Центр учбової літератури», 2019. 382 с.
- References (transliterated)**
1. Michaitrakun S., Manokit R., Kriangsak Singkeaw K., Kamdaeng O. Enrichment of gamma-aminobutyric acid (GABA) content using germinated parboiled rice in Thai layered dessert (kanom chan) products. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, December 2023, Vol. 34, pp. 100816, doi: 10.1016/j.ijgfs.2023.100816.
 2. Antonenko A. V., Brovenko T. V., Stukal's'ka N. M., Kry'voruchko M. Yu. ta in. *Texnologiya desertiv funkcional'nogo pry'znachennya* [Technology of functional desserts]. *Taurian Scientific Herald. Series: Technical sciences*, 2022, no. 5, pp. 28–37, doi: 10.32851/tnv-tech.2022.5.4.
 3. Kurzer A., Wiriyanpanich T., Cienfuegos C., Spang E., Guinard J. Exploring fruit's role in dessert: The Dessert Flip and its impact on university student acceptance and food waste. *Food Quality and Preference*, 2020, Vol. 83, p. 103917, doi: 10.1016/j.foodqual.2020.103917.
 4. Dzuba N. A., Oliinyk M., Kalugina I. M., Poplavska S. A. Improving the technology of aeration of the food system of mousse at horeca enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023, Vol. 2, no. 11 (122), pp. 74–82, doi: 10.15587/1729-4061.2023.275615.
 5. Tsykhanovska I., Yevlash V., Alexandrov A., Khamitova B., Svidlo K. Forming the structure of whipped desserts when introducing the food additive "Magnetofood" to their formulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, Vol. 2, no. 11 (98), pp. 45–55, doi: 10.15587/1729-4061.2019.161855.
 6. DSTU 7183:2010. *Plody subtropichnykh kultur svizhi. Tekhnichni umovy. [Fruits of subtropical crops are fresh. Specifications]*. Kyiv. 2010. 27 p.
 7. Zdobnov O. I., Cyganenko V. A. *Zbirny'k receptur strav ta kulinarnykh vyrobiv: Dlya pidpr'yemstv gromads'kogo xarchuvannya [A collection of recipes for dishes and culinary products: For catering enterprises]*. Kyiv. TOV "Vydavny'cztvo Arij", 2009. 680 p.
 8. Cherevko O. I., Mykhajlov V. M., Mayak V. I., Mayak O. A. *Reologiya v procesax vyrobnyctva xarchovykh produktiv: navch. posibnyk: u 2 ch. Ch. 1. Klas'fikaciya ta xarakterystyka nenyutonivskykh ridyn* [Rheology in food production processes: training. manual: in 2 hours. Part 1. Classification and characteristics of non-Newtonian fluids]. Kharkiv: XDUXT, 2014. 244 p.
 9. Anandha Rao M. *Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications*. Springer-Verlag US, 2007. 482 p. doi: 10.1007/978-0-387-70930-7.
 10. Cherevko O. I., Poperechnyj A. M. *Procesy i aparaty xarchovy'x vy'robny'cztv: pidruchny'k. – 2-e vy'dannya, dop. ta vy'pr [Processes and devices of food production: a textbook. – 2nd edition, add. and ex.]*. Kharkiv. Svit Knyg, 2014. 495 p.
 11. Govorun T. P., Budnyk A. F., Yuskayev V. B. *Fizy'chni vlastyivosti i metody doslidzhennya materialiv: navch. posib [Physical properties and methods of materials research: teaching. manual]*. Sumy. Sumskiy derzhavnyj universytet, 2014. 255 p.
 12. Fan Zhu. Chemical and biological properties of feijoa (*Acca sellowiana*). *Trends in Food Science & Technology*, 2018, Vol. 81, pp. 121–131, doi: 10.1016/j.tifs.2018.09.008.
 13. Pasquariello M. S., Mastrobuoni F. D. Agronomic, nutraceutical and molecular variability of feijoa. *Scientia Horticulturae*, 2015, no. 191 (6), pp. 1–9, doi: 10.1016/j.scienta.2015.04.036.
 14. Almeida J. Dos Santos Opuski De., Dias C. O., Arriola N. D. A., De Freitas B. S. M., De Francisco A., Petkowicz C. L. O. Feijoa (*Acca sellowiana*) peel flours: A source of dietary fibers and bioactive compounds. *Food Bioscience*, 2020, Vol. 38, p.100789, doi: 10.1016/j.fbio.2020.100789.
 15. Roderick J. W. Bio-active products from fruit of the feijoa. *Food Chemistry*, 2010, no. 121 (4), pp. 923–926, doi: 10.1016/j.foodchem.2010.01.047.
 16. Verxovna Rada Ukrainy. *Pro zatverdzhennya Norm fiziologichnyx potreb naseleennya Ukrainy v osnovnyx xarchovyx rehovynax i energiyi* [On the approval of the norms of physiological needs of the population of Ukraine in basic food substances and energy]. NAKAZ Ministerstvo oxorony zdorov'ya Ukrainy vid 03.09.2017, 2017, no 1073. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17#Text> (accessed 03.12.2023).
 17. Amer A. A., Elgohary R., Ibrahim F. M., Taha H. S. Anticoagulant effect of Feijoa sellowiana extracts generated by different biotechnological techniques. *Heliyon*, 2023, Vol. 9 (4), p. 15444, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15444.
 18. Smeriglio A., Denaro M., De Francesco C., Cornara L., Barreca D. Feijoa Fruit Peel: Micro-morphological Features, Evaluation of Phytochemical Profile, and Biological Properties of Its Essential Oil. *Antioxidants*, 2019, no. 8 (8), p. 320, doi: 10.3390/antiox8080320.
 19. Ielpo M. T. L., Basile A., Miranda R. Immunopharmacological properties of flavonoids. *Fitoterapia*, 2000, no. 71 (1), pp. 101–109, doi: 10.1016/S0367-326X(00)00184.
 20. Santos P. H., Kammers j. C., Silva A. P., Oliveira J. V., Hense H. Antioxidant and antibacterial compounds from feijoa leaf extracts obtained by pressurized liquid extraction and supercritical fluid extraction. *Food Chemistry*, 2021, Vol. 344 (15), p. 128620, doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128620.
 21. Cebi N., Sagdic O. Characterization of Feijoa sellowiana leaves based on volatile and phenolic compound compositions and antimicrobial properties. *Food Sci. Technol (Campinas)*, 2022, Vol. 42, p. 14221, doi: 10.1590/fst.14221.
 22. Basile A., Vuotto M. L., Violante U. Antibacterial activity in *Actinidia chinensis*, Feijoa sellowiana and *Aberia caffra*. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 1997, no. 8 (3), pp. 199–203, doi: 10.1016/S0924-8579(97)00376-2.
 23. Fazli F., Babaei A., Nokhodchi F., Moazeni M., Fazli H., Nahvi N., Ebrahimnejad P. Biofabrication of silver

- nanoparticles with Feijoa sellowiana tailored by box-behnen design: An eco-friendly approach to enhance antifungal properties in Children's toothpaste. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2024, p. 105361, doi: 10.1016/j.jddst.2024.105361.
24. Zhu Z., Song X., Yao J., Li Z., Jiang Yu., Yu Q., Huang Z., Liu H. Structural characteristics, functional properties, antioxidant and hypoglycemic activities of pectins from feijoa (*Acca sellowiana*) peel. *Food Chemistry*, 2023, Vol. 428, p. 136819, doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136819.
25. Liu J., Wang T., Huang B., Zhuang Yu., Hu Yo., Fei P. Pectin modified with phenolic acids: Evaluation of their emulsification properties, antioxidation activities, and antibacterial activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 31 March 2021, Vol. 174, pp. 485–493, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.01.190.
26. Farzaliev E. B., Okten S. Production and characterization of fruit jam with activated pectin using wild hawthorn puree (*Crataegus monogyna* Jacq.). *Natural Product Research*, 2023, doi: 10.1080/14786419.2023.2283760.
27. Kalugina I. M., Dzyuba N. A., Dubyna A. A. Teknologiya solodky`x strav iz vy`kory`stannyam diyety`chny`x dobavok dlya zakladiv restorannogo gospodarstva [Technology of sweet dishes using dietary supplements for restaurants]. *Restoranny`j i gotel`ny`j konsalty`ng. Innovaciyi*, 2023, Vol. 6, no. 1, pp. 110–124, doi: 10.31866/2616-7468.6.1.2023.278475.
28. Iorgacheva E. G., Makarova O. V., Avetisyan K. V. Regulation of structural and rheological properties of jelly and whipped masses for two-layer marmalade. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, Vol. 2, no. 12 (68), pp. 122–127, doi: 10.15587/1729-4061.2014.23380.
29. Goralchuk A., Grinchenko O., Riabets O., Kotlyar O. Food dispersion systems process stabilization. A review. *Ukrainian Food Journal*, 2019, no. 8 (4), pp. 699–732, doi: 10.24263/2304-974X-2019-8-4-4.
30. Sokolovska I. O., Kambulova J. V., Overchuk N. O. Study of the water binding in the gel systems of pectin and sodium alginate. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 2, no. 11 (80), pp. 4–11, doi: 10.15587/1729-4061.2016.65746.
31. Ofoli R. Y., Morgan R. G. Steffe J. F. A generalized rheological model for inelastic fluid foods. *Journal of Texture Studies*, January 2007, no. 18 (3), pp. 213–230, doi: 10.1111/j.1745-4603.1987.tb00899.x.
32. Cerbelaud M., Mortier F., Semaan H., Gerhards J., Crespín B., Ferrando R., Videcoq A. Numerical study of the effect of particle size dispersion on order within colloidal assemblies. *Materialstoday Communications*, March 2024, Vol. 38, p. 107973, doi: 10.1016/j.mtcomm.2023.107973.
33. Arxipov V. V. *Restoranna sprava: Asorty`ment, texnologiya, upravlinnya yakosti produkciyi u suchasnomu restorani. 3-tye vy`d. navch. posib [Restaurant business: Assortment, technology, product quality management in a modern restaurant. 3rd edition. education manual]*. Kyiv. Centr uchbovoyi literatury, 2019. 382 p.

Відомості про авторів (About authors)

Калугіна Ірина Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, Одеський національний технологічний університет, доцент кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3385-9722>; e-mail: ik101273@gmail.com.

Kalugina Iryna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of restaurant and healthy food technologies, Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3385-9722>; e-mail: ik101273@gmail.com.

Поплавська Світлана Олександрівна – асистент, Одеський національний технологічний університет, асистент кафедри технології ресторанного і оздоровчого харчування; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2439>; e-mail: ifc.technolog@gmail.com.

Poplavska Svitlana – assistant, Department of restaurant and healthy food technologies, Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1097-2439>; e-mail: ifc.technolog@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Калугіна І. М., Поплавська С. О. Структурно-механічні властивості мусу з фейхоа. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 49-57. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.07.

Please cite this article as:

Kalugina I., Poplavska S. Structural and mechanical properties of feijoa mousse. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 49-57, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.07.

*Надійшла (received) 07.02.2024
Прийнята (accepted) 09.03.2024*

УДК 66.04.54

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.08

ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ В ПРОЦЕСІ ВИПАРОВУВАННЯ РОЗЧИНІВ У ВИПАРНИХ АПАРАТАХ

Д. І. НЕЧИПОРЕНКО^{1*}, Т. Б. НОВОЖИЛОВА¹, А. О. САКУН¹, Є. В. ПОНОМАРЕНКО²

¹Кафедра Хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

²Кафедра Інтегровані технології, процеси і апарати Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: Dmytro.Nechyporenko@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ Сьогодні, у зв'язку з різким подорожчанням енергоносіїв, у всьому світі надзвичайно гостро стоять питання зниження енерговитрат та обмеження шкідливих викидів у навколишнє середовище практично у всіх галузях промисловості. Тому в статті розглянуто питання енергозбереження під час процесу випарювання різноманітних розчинів у багатокорпусних випарних установках на підприємствах хімічної та харчової промисловості. В даний час на будь-якому підприємстві багатокорпусні випарні установки, що застосовуються для випарювання розчинів, є споживачами дуже великої кількості тепла і вимагають значних капітальних витрат. Відомо, що принцип багатоступеневого випарювання дає значний економічний ефект порівняно з одноступінчастим. Тому найбільш важливими завданнями зниження енерговитрат в процесі випарювання є: по-перше – зменшення витрати гріючої пари на одиницю випареної води, що досягається за рахунок паралельної подачі живильного розчину по корпусах багатокорпусної випарної установки і підігріву вихідного розчину до температури, близької до температури кипіння вторинними теплоносіями – конденсатом та екстрапаром першого корпусу випарного апарату; по-друге – удосконалення конструкції поверхні нагріву камери, що гріє та руху розчину і гріючого теплоносія. За допомогою розробленого програмного комплексу для автоматичного виконання теплотехнічних розрахунків багатокорпусних випарних станцій було проведено дослідження впливу температури пари, що гріє, на розміри поверхні теплообміну за інших рівних умов для чотирикорпусної та п'ятикорпусної випарних установок, а також досліджено процес кипіння розчину в широко щілинних каналах камери, що гріє, випарного апарату при різних режимах його роботи. Наведено розроблену конструкцію розчинної та парової пластин гріючої камери випарного апарату, яка дозволяє оптимізувати рух рідинної та парорідинної фази розчину в процесі нагріву. Отримані результати дозволяють видати рекомендації щодо найефективніших режимів роботи багатокорпусних випарних установок, а також встановити шляхи інтенсифікації їх роботи.

Ключові слова: випарний апарат; багатокорпусна випарна установка, конденсат; екстрапар; циркуляція; підживлення

WAYS TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION IN THE EVAPORATION PROCESS OF SOLUTIONS IN EVAPORATION APPARATUS

D. NECHIPORENKO¹, T. NOVOZHILOVA¹, A. SAKUN¹, E. PONOMARENKO²

¹Department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

²Department of Integrated Technologies, Processes and Equipment, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Today, in connection with the sharp increase in the price of energy sources, the issue of reducing energy consumption and limiting harmful emissions into the environment in almost all industries is extremely acute all over the world. The issues of energy saving in the process of evaporation of various solutions in multi-effect evaporation plants at chemical and food industry enterprises are considered. It is known that the principle of multi-stage evaporation gives a significant economic effect compared to a single-stage one. Currently, at any enterprise, multi-body evaporation plants used for evaporation of solutions are consumers of a very large amount of heat and require significant capital costs. The most important tasks of reducing energy costs are: firstly, reducing the consumption of heating steam per unit of evaporated water, which is achieved through parallel supply of a nutrient solution through the housings of a multi-effect evaporation plant and heating the initial solution to a temperature close to the boiling point with secondary coolants - condensate and extra steam of the first evaporator housing; secondly, improving the design of the heating surface of the heating chamber and establishing optimal modes of movement of the solution and heating coolant. Using the developed software package for automatically performing thermal engineering calculations of multi-effect evaporation stations, a study was carried out of the influence of the temperature of the heating steam on the dimensions of the heat exchange surface, all other things being equal, for four-effect and five-effect evaporation plants, and also the process of boiling of the solution in the wide slot channels of the heating chamber of the evaporator was investigated. device under different operating modes. The developed design of the solution and steam plates of the heating chamber of the evaporator is presented, which allows optimizing the movement of the liquid and vapor-liquid phases of the solution during its heating. The results obtained make it possible to give recommendations on the most effective operating modes of multi-effect evaporation plants, as well as to establish ways to intensify their operation.

Keywords: evaporator; multi-effect evaporation plant, condensate; extrapair; circulation; recharge

Вступ

Зниження енерговитрат і зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище є дуже актуальним

питанням сьогодення і може бути досягнуто розробкою новітніх програм математичного моделювання роботи випарних установок (ВУ) та

впровадженням у виробництво раціональних теплових схем і конструкцій апаратів, які передбачають такий розподіл теплоносіїв стосовно технологічного процесу, при якому забезпечувались би задані технологічним регламентом параметри (температура, концентрація, тиск і т.і.) при мінімальній витраті теплової та електричної енергії.

1. Оптимізація роботи багатокорпусних випарних установок

Практично на будь якому підприємстві де використовують процес концентрування різноманітних розчинів, встановлюється випарна установка, яка призначена для згущення розчину до необхідного вмісту сухих речовин. Процес випарювання широко застосовується в хімічній, харчовій та фармацевтичній галузях промисловості, а також при очищенні стічних вод від різних токсинів.

З метою економії первинної пари процес випарювання зазвичай проводиться у багатокорпусних випарних установках (БКВУ) з багаторазовим використанням теплоти вторинної пари [1,2]. Відомо, що принцип багатоступеневого випарювання дає значний економічний ефект порівняно з одноступінчастим. В даний час на будь якому підприємстві БКВУ, що застосовуються для випарювання розчинів, є споживачами дуже великої кількості тепла і вимагають значних капітальних витрат. Однак теплотехнічні розрахунки БКВУ і досі залишаються дуже трудомісткими у зв'язку з труднощами створення автоматизованої системи для її розрахунку, що пов'язано з великою кількістю параметрів, що змінюються в процесі роботи БКВУ. При складанні раціональних теплових схем необхідно враховувати та використовувати новітні досягнення як в апаратному оформленні, так і в теплотехнічних розрахунках. Тому оптимізація роботи БКВУ може значно скоротити енерговитрати без значних капітальних вкладень.

Найбільш важливими завданнями зниження зазначених витрат є: по-перше – зменшення витрати гріючої пари на одиницю випареної води, що досягається за рахунок паралельної подачі живильного розчину по корпусах БКВУ і підігріву вихідного розчину до температури, близької до температури кипіння вторинними теплоносіями – конденсатом та екстрапаром першого корпусу випарного апарату (ВА); по-друге – удосконалення конструкції поверхні нагріву камери, що гріє [2,3].

В основу алгоритму розрахунку було покладено принципову схему прямої випарної станції, представлена на рис. 1.

У цій схемі максимальну кількість підігрівачів вихідного розчину було прийнято n_k+3 . Дійсна кількість підігрівачів може бути меншою за максимальну і зазвичай вибирається в залежності від конкретних умов виробництва.

З проведеного аналізу чисельного експерименту можна зробити такі висновки:

1. Підвищення температури пари, що гріє, призводить до значного зниження поверхні нагріву гріючої камери ВУ. Однак підвищення температури, у свою чергу, дуже сильно впливає на термостійкості розчини. Тому необхідно обирати такі конструкції камер, що гріють, в яких час знаходження термостійких розчинів зводилося б до мінімуму

2. При подачі вхідного розчину на першу випарну установку БКВУ $f_1=(50, 60, 70, 80)$ % ознака, що відповідає схемі підігріву розчину, коли другий підігрівач обігривається конденсатом пари першого корпусу, а третій – екстрапаром першого корпусу, виключається, так як спостерігається зростання площі поверхні теплообміну.

3. З усіх розглянутих варіантів кращий варіант з примусовою циркуляцією розчину по корпусах $f_1=(80-20-0-0)$ %, так як при цій схемі площа теплообмінної поверхні зменшується майже на 50 % однак в водночас збільшуються енерговитрати на насосне обладнання та його експлуатацію.

4. Площі при природній циркуляції та розподілі підживлення по корпусах $f_1=(50-35-15-0)$ % зростають майже на 17 % у порівнянні зі схемою $f_1=(60; 70 \text{ та } 80-0)$ %, а при примусовому – на 11 %.

5. Витрата гріючої пари, при природній і примусовій циркуляції та розподілі $f_1=(50-35-15-0)$ % менше на 10%, ніж при схемі живлення $f_1=(60; 70 \text{ і } 80)$ %.

- ✓ простотою пристрою;
- ✓ компактністю;
- ✓ малою металоємністю;
- ✓ високим коефіцієнтом теплопередачі;
- ✓ малим часом контакту розчину з поверхнею нагрівання;
- ✓ легкістю зміни величини поверхні, що гріє;
- ✓ доступністю поверхні, що гріє, для механічного чищення від накипу.

Мінімальний час контакту розчину з поверхнею, що гріє, дозволяє випарювати такі розчини, які по своїх фізико-хімічних властивостях дуже чутливі до тривалих впливів високої температури.

Незважаючи на всі ці переваги, ВА із ШПКГ, поки ще не знайшли широкого застосування в нашій країні. Це пояснюється тим, що вони мало вивчені, відсутні дані про їхню роботу й вплив різних способів руху розчину в каналах на продуктивність апарата.

Дослідженням процесу кипіння розчину в тонкій плівці (орієнтовно 2-8 товщини прикордонного шару, на наш погляд приділялася недостатня увага. В основному вивчалися процеси кипіння розчинів або у великому об'ємі, або в повністю заповненої розчином, що рухається, трубці [5].

2. Удосконалення конструкції поверхні нагріву камери, що гріє

Останнім часом для випарювання розчинів у багатьох галузях промисловості знайшов застосування новий тип випарного апарата, поверхня теплообміну якого виконана з листового матеріалу

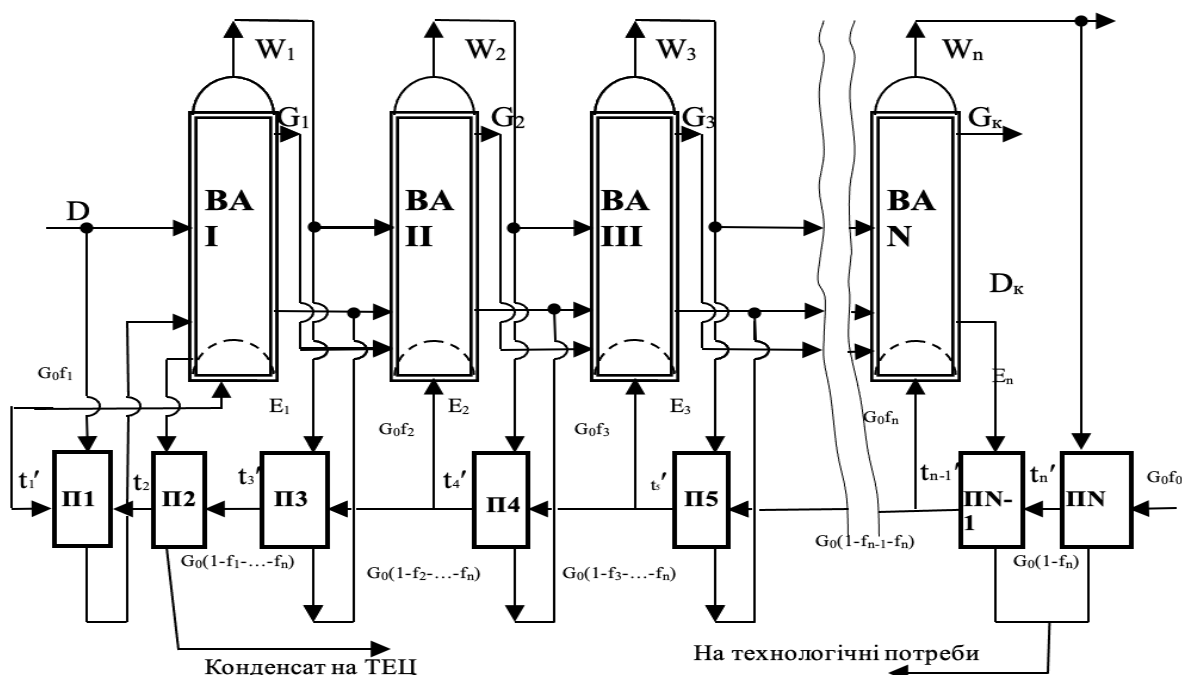


Рис. 1 – Прямоточна багатокорпусна випарна установка:

BA 1, BA 2, ..., BAN – випарні апарати відповідно за ступенями підігріву; П1, П2, ..., ПN – підігрівачі вихідного розчину; D1 – пар, що гріє; W1, W2, ..., Wn, – вторинні пари; G0 – вихідний розчин; t1', t2', ..., tn' – температури вихідного розчину після відповідного підігрівача; E1, E2, ..., En, – екстрапари по корпусах ВА; f – підживлення ВА вихідним розчином

різного профілю [4]. Це випарні апарати з розбірними або нерозбірними ширококанальними пластинчастими камерами, що гріють (ШПКГ).

Ці апарати в порівнянні із традиційними трубчастими ВА характеризуються наступними перевагами:

У зв'язку з тим і сьогодні практично відсутня надійна методика теплового розрахунку ВА зі стікаючою плівкою. Найвний розрахунковий нормативний матеріал дає завищене значення коефіцієнта тепловіддачі, тому що рівняння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі має вигляд:

$$\alpha = \frac{2,35 + 0,047 Re^{0,2} + 0,0021 Re^{0,8} Pr^{0,65}}{(v^2 Re)^{0,333}}$$

Дане рівняння не враховує вплив на процес теплообміну теплового навантаження (корисної різниці температур). Тому це рівняння дає значно завищене значення коефіцієнта тепловіддачі.

При розробці існуючих методів розрахунку також не враховувались наступні фактори:

- ✓ імовірність зародження на поверхні нагріву парових пухирців;
- ✓ швидкість пароутворення (ріст парових пухирців і частота їх відриву від поверхні нагріву);
- ✓ напрям руху парових пухирців що відірвалися у плівці.

Відомо, що процес кипіння – це безперервне і постійне утворення з розчинника парової фази у вигляді окремих парових пухирців.

Головною умовою випару розчинника з розчину при кипінні є перегрів розчину до температури насичення при тиску поза плівкою, тобто система повинна бути в стані статичної рівноваги.

Згідно з законом зростання ентропії імовірність зародження парового пухирця на поверхні нагріву може бути описана вираженням $e^{a(s_1-s_2)}$, в експоненті якого стоїть зміна ентропії при безперервному переході системи зі стану з більшою ентропією «s1» у стан з меншою ентропією «s2», що і відповідає стану рівновазі. Зміна ентропій визначається термодинамічною постійною « ϑ_t », яка залежить відповідно від тиску, при якому безпосередньо проводиться процес випаровування й типу розчину. З рівнянь теплового балансу й Клайперона-Клаузіуса було знайдено

$$\vartheta_t = \frac{r \rho''}{c \rho}$$

де r – схована теплота пароутворення при досягненні системи рівноважного стану, Дж/кг; ρ'' , ρ – відповідно щільності пари і розчину при рівноважному стані системи, кг/м³; c – теплоємність розчину, Дж/кг·К.

Таким чином, імовірність зародження парового міхура носить експонентний характер і є функцією $e^{a\vartheta_t}$, де a безрозмірний коефіцієнт.

Як відомо процес випаровування розчинника з розчину здійснюється в наступній послідовності.

Спочатку паровий пухирець утворюється в центрі паротворення, потім росте в об'ємі й при досягненні критичного розміру відривається від поверхні нагрівання й спливає у плівці, що рухається уздовж неї, захоплюючи за собою деяку кількість розчину із пристенної зони (так званий прикордонний шар) до верхньої поверхні плівки.

Простір, який звільнився після відриву пухирця, миттєво заповнюється новою порцією розчину і при досягненні температури, що перевищує температуру насичення на величину термодинамічної постійної « ϑ_1 » (ентропія « s_1 ») знову починається зародження нового пухирця. У процесі вспиття парового пухирця з навколишнього його розчину випаровується розчинник і тому він росте у геометричному розмірі. З вище наведеного зрозуміло що від зовнішньої поверхні плівки паровий пухирець відривається в паровий простір з температурою рівноваги (ентропія « s_2 »).

З усього вищевикладеного можливо зробити наступні висновки: інтенсивність теплообміну при кипінні розчину залежить від швидкості пароутворення на поверхні нагріву (частота зародження й відриву парового пухирця) і безумовно від швидкості вспиття парового пухирця – процес турбулізації плівки розчину.

Як відомо, швидкість пароутворення визначається питомим тепловим потоком « q », який передається від поверхні нагрівання до розчину який нагрівається, й термодинамічними характеристиками пари, що утвориться ($r \rho^*$), тобто

$$\omega = \frac{q}{r \rho^*}.$$

Як ми уже казали одним з провідних факторів, що впливають на інтенсивність тепловіддачі при кипінні в плівці, є швидкість вспиття парового пухирця тому що паровий пухирець, що спливає викликає процес турбулізації плівки розчину, а швидкість видалення парового пухирця із плівки в парову зону впливає на частоту відриву парового пухирця від поверхні нагрівання. На формування кількості парових пухирців й швидкість їх вспиття зазвичай впливають так звані сили поверхневого натягу – системи «пара-рідина».

Відомо що від величини сил поверхневого натягу залежить товщина плівки та режим випару й вспиття парового пухирця.

Режими випару й вспиття парового пухирця відповідно характеризуються критеріями випару Рейнольдса й вспиття Вебера:

$$\text{Re} = \frac{q}{r \rho^* v} \left(\frac{\sigma}{g \rho} \right)^{0,5};$$

$$\text{We} = \frac{\rho^* \omega^2}{\sigma} \left(\frac{\sigma}{g \rho} \right)^{0,5}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі є функція наступних змінних

$$\alpha = f(q; \sigma; \rho; \rho^*; r; v; \omega^2).$$

З урахуванням сказаного, методом аналізу розмірності було отримане рівняння для процесу теплообміну при кипінні в поверхні, що рухається уздовж, нагрівання плівки, що має вигляд

$$\text{Nu} = x_1 \text{Re}^{x_2} \cdot \text{We}^{x_3} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot e^{a \vartheta_1},$$

де x_1, x_2, x_3, a – безрозмірні коефіцієнти.

Для перевірки на адекватність отриманого рівняння були проведені експерименти на лабораторній установці, що представляє собою випарний апарат з ШПКГ, із шириною каналу від 8 до 12 мм [6-10].

Необхідно відзначити, що при кипінні розчину в каналі турбулізація потоку створюється за рахунок пухирців пари, які утворюються й відриваються від поверхні, що гріє, то на відміну від гофрованої пластини пластинчастих теплообмінників, ширококанальна пластина випарного апарата може виконуватися плоскою із привареними до неї ребрами жорсткості [11,12].

Значним недоліком ШПКГ є підвищений гідравлічний опір щілини, що викликає необхідність установки насоса для створення примусової циркуляції розчину [13-17].

Тому була проведена дослідницька робота із ШПКГ з шириною каналу 10-12 мм, по вивченню процесу кипіння розчину у відносно великому об'ємі. Збільшення ширини каналу камери, що гріє, до 10-12 мм у свою чергу дозволило до деякої міри знизити гідравлічний опір каналів камери, що гріє.

3. Мета й завдання експериментальної роботи

Метою даної експериментальної роботи було:

- ✓ визначення оптимальних умов роботи ВА із ШПКГ;
- ✓ визначення основних технічних характеристик ВА із ШПКГ;
- ✓ конструктивне оформлення вузлів ВА із ШПКГ.

Звідси впливають конкретні завдання дослідження:

1. Визначення залежності продуктивності випарного апарата із ШПКГ, від питомого теплового навантаження при постійній ширині щілини, рівної 10 мм.
2. Визначення гідравлічних опорів ШПКГ при різних режимах роботи ВА.
3. Визначення оптимальних умов роботи ВА із ШПКГ.
4. Конструктивне відпрацювання вузлів ВА.

Для рішення поставлених завдань передбачався наступний порядок і обсяг робіт:

1. Розробка конструкції ширококанальної пластини і її виготовлення.
2. Виготовлення моделі ВА із примусовою циркуляцією та ШПКГ із плоских пластин з привареними упорами.
3. Монтаж, налагодження установки й оснащення її контрольно-вимірювальними приладами.

4. Вихід на робочі режими й вивчення процесу випарювання розчинів у ВА із ШПКГ при плівковому режимі кипіння з висхідно-падаючим і з падаюче-висхідним потоком розчину в каналі при двох варіантах уведення киплячого розчину в сепаратор.

5. Обробка отриманих експериментальних даних.

6. Розрахунок техніко-економічних показників ВА із ШПКГ і видача рекомендацій із застосування.

На рис. 2 наведено схеми ВУ для вивчення процесу випарювання розчинів.

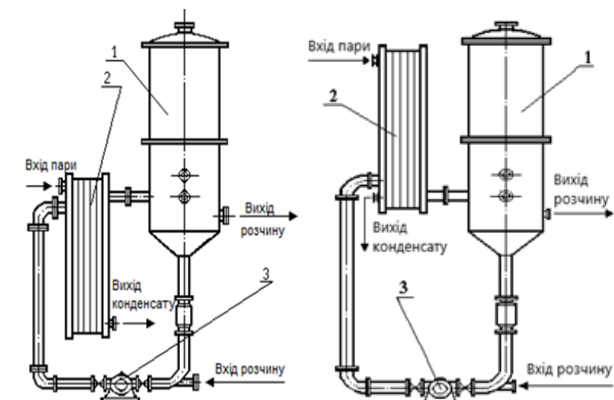


Рис. 2 – Випарна установка з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє: а) з падаюче-висхідним потоком розчину в каналі; б) з висхідно-падаючим потоком розчину в каналі 1 - сепаратор; 2 - розбірна ширококанальна пластинчаста камера, що гріє; 3 - насос

Під час проведення досліджень змінювалися:

- параметр упарювання від $\vartheta_{тер} = 0,0569$ °С до $\vartheta_{тер} = 0,441$ °С;

- корисна різниця температур від $\Delta t_n = 10$ °С до $\Delta t_n = 25$ °С;

- відношення площ перерізу зворотної циркуляційної труби до площі перерізу каналів гріючої камери від $n_{ц} = 0,1$ до $n_{ц} = 0,3$;

- теплове навантаження від $q = 23000$ Вт/м² до $q = 74250$ Вт/м².

4. Обговорення

Грунтуючись на отриманих даних, були побудовані графіки залежності питомого теплового навантаження q від корисної різниці температур Δt_n та коефіцієнта тепловіддачі α_2 від Δt_n , які показані відповідно на рис. 3 та 4.

З рис. 3 видно, що збільшення корисної різниці температур призводить до збільшення теплового навантаження. На характер цього збільшення впливає параметр упарювання.

Як видно з рис. 4, зменшення параметра упарювання призводить до збільшення в'язкості розчину та обсягу паророзчинної суміші в зоні кипіння. Перше призводить до зменшення коефіцієнта тепловіддачі ($\alpha \sim \mu^{-0,49}$), а друге – до збільшення гідравлічного опору контуру циркуляції.

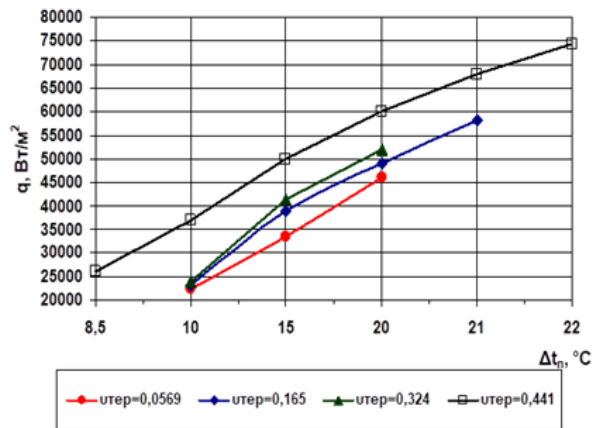


Рис. 3 – Залежність питомого теплового навантаження q від корисної різниці температур Δt_n

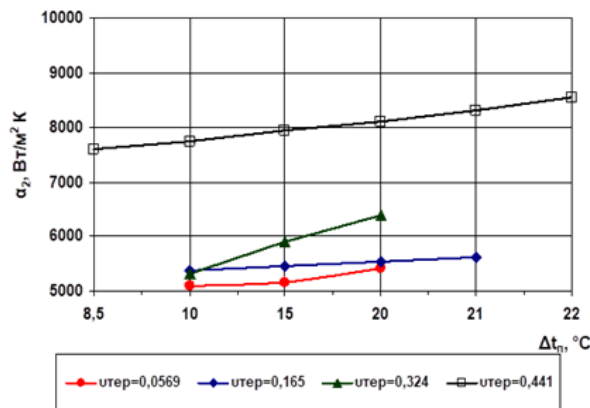


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі α_2 від корисної різниці температур Δt_n при $n_{ц} = 0,15$

При значенні $n_{ц} = 0,05 \div 0,1$ в канал надходить мала кількість розчину і можливий повний перехід розчину, що випаровується, в парову фазу. При цьому має місце повне утворення парової фази (заповнення каналів паром) та утворення тонкої плівки розчину на поверхні нагріву.

Збільшення значення $n_{ц}$ більше 0,16 призводить до значного збільшення зони конвективного теплообміну та зменшення зони бульбашкового кипіння, що призводить до зменшення інтенсивності перенесення тепла.

Як видно з проведеного аналізу роботи гріючої камери ВА для максимальної інтенсифікації процесу випарювання необхідно, щоб кратність руху розчину $n_{ц}$ по контуру дорівнювала 0,15.

Висновки

На підставі отриманих результатів експериментів з вивчення роботи ВА з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє, можна зробити наступні висновки:

- ВА з ШПКГ мають високі теплотехнічні показники та відносяться до найбільш ефективних конструкцій.

- Ефективність роботи ВА залежить від характеру руху розчину.

- На ефективність роботи ВА впливає характер введення паророзчинної суміші в сепаратор. Так, продуктивність ВА з тангенціальним введенням на 8-10% нижче, ніж при прямому введенні.

- Гідрравлічний опір ШПКГ зі стікаючою плівкою вище ніж у трубчастих (до 1800 кг/м²) тому цей тип камери можна використовувати лише в апаратах з примусовою циркуляцією.

- Коефіцієнт теплопередачі ВА з ШПКГ майже на 60% вище, ніж ВА з трубчастою камерою, що гріє.

Список літератури

1. Кулінченко В. Р., Ткаченко С. Й. *Теплопередача з елементами масообміну (Теорія і практика процесу). Навч. посіб.* Вінниця: ВНТУ, 2012. 180 с.
2. Кулінченко В. Р. Мирончук В. Г. *Випарювання і випарні апарати у розрахунках і конструюванні: Навч. посіб.* К.: Кондор, 2006.– 392 с.
3. Шевель С. В., Воробйов М. В. *Теплообмін при кипінні. Навч. посіб.* з дисципліни «Теплообмін при фазових перетворюваннях і випромінюванні». Київ КП ім. Ігоря Сікорського, 2021. 55 с.
4. Данилов Ю. Б. *Науково-практичні засади створення енергозберігаючого теплообмінного та випарного обладнання нафтохімічного комплексу України: дис. д-ра техн. наук / Ю. Б. Данилов. Х., 2008. 376 с.*
5. Михайличенко В. П., Пітак І. В., Новожилова Т. Б. Дослідження процесів гідродинаміки у випарному апараті з примусовою циркуляцією та кипінням розчину в трубах ScienceRise. Харків. НВП ПП «Технологічний центр». 2017. № 4 (33). 76. С. 41-45. doi:10.15587/2313-8416.2017.97799.
6. Фокін В. С., Данилов Д. Ю., Нечипоренко Д. І. Дослідження процесу кипіння розчину в щільних каналах камери, що гріє. *Інтегровані технології й енергозбереження.* Харків. НТУ «ХПІ», 2008. №3. С. 16-20.
7. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V. Investigation of two-phase flow hydrodynamics of heat exchange tube outlet falling film evaporator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021. № 864. doi: 10.1063/5.0068409.
8. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V., Khomyakova T. V. Mathematical model of two-phase flow processes in heat exchange tubes of the falling film evaporator. *AIP Conference Proceedings.* 2021. № 2388. doi: 10.1088/1755-1315/864/1/012037.
9. Нечипоренко Д. І., Панасенко В. О., Новожилова Т. Б. Дослідження процесу кипіння розчинів у розбірній ширококанальній пластинчастій грючій камері випарного апарату. *Праці НДІОХІМ.* 2010. Т. 76. С. 107–112.
10. Матісс Д. Ю., Жабина І. О. Шляхи зниження енерговитрат при випаровуванні розчинів у багатокорпусних випарних установках. *X Міжнародна науково-практична студентська конференція магістрантів (05–08 квітня 2016 року): матеріали конференції: у 3-х ч. – Ч. 3 / за ред. проф. Є.І. Сокола.* Харків : НТУ «ХПІ», 2016. С. 47-48.
11. Михайличенко В. П., Ракова К. О. Шляхи зниження енерговитрат при виробництві напівсолодких вин. *XI Міжнародна науково-практична конференція*

магістрантів та аспірантів: матеріали конф., 18-21 квітня 2017 р.: Ч. 3. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. С. 27.

12. Нечипоренко Д. І., Слізаров А. П. Інтенсифікація процесу сушіння молока. *Modern research in world science. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua".* Львів, Україна. 2023. С. 308-311.
13. Yu N., Hu H., Xia W., Zhao Z., & Cheng. Iron diselenide/carbon black loaded mushroom-shaped evaporator for efficiently continuous solar-driven desalination. *Journal of Colloid and Interface Science.* 2024. 658. P. 238-246.
14. de Paula C. H., Duarte W. M., Rocha T. T. M., de Oliveir, R. N., & Maia A. A. T. Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. *International Journal of Refrigeration.* 2020. 113. P. 10-20.
15. Xu J., Wang G., Zhu L., Jiang G., Lei Y., Zeng Z., & Xue L. Superwetting reduced graphene oxide/alginate hydrogel sponge with low evaporation enthalpy for highly efficient solar-driven water purification. *Chemical Engineering Journal.* 2023. 455. P. 140704.
16. Fan T., Lan S., & Li Y. Synergistic, Adaptive, Continuous-flow, and Low-carbon Solar Evaporation and Electrochemical Treatment (SEET) System—A Combined Numerical and Experimental Study. *Separation and Purification Technology.* 2023. 323. P. 124354
17. Xie M., Zhang P., Cao Y., Yan Y., Wang Z., & Jin C. A three-dimensional antifungal wooden cone evaporator for highly efficient solar steam generation. *npj Clean Water.* 2023. 6(1). 12. doi: 10.1038/s41545-023-00231-3.

References (transliterated)

1. Kulichenko V., Tkachenko C. *Heat transfer with mass transfer elements (Theory and practice of the process).* Education manual. Vinnitsia. VNTU, 2012. 180 p.
2. Kulichenko V. Myronchuk V. *Evaporation and evaporation devices in calculations and design: Study.* Manual. K. Condor, 2006. 392 p.
3. Shevel E., Vorobyov M. *Heat exchange during boiling.* Education manual from the discipline "Heat exchange during phase transformations and radiation". Kyiv. KPI named after Igor Sikorsky 2021. 55 p.
4. Danilov Yu. *Scientific and practical principles of creating energy-saving heat exchange and evaporative equipment of the petrochemical complex of Ukraine:* dissertation. Dr. Tech. of Sciences / Yu. Danilov. Kh., 2008. 376 p.
5. Mihaylichenko V., Pitak I., Novozhylova T. Research of hydrodynamics processes in the evaporator with forced circulation and boiling of solution in pipes. 2017. ScienceRise, 2017, 4(2), pp. 41-45, doi:10.15587/2313-8416.2017.97799.
6. Fokin V., Danilov D., Nechyporenko D. Research of the boiling process of the solution in the slit channels of the heating chamber. *Integrated technologies and energy saving.* Kharkiv. NTU "KhPI", 2008, 3, pp. 16-20.
7. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V. Investigation of two-phase flow hydrodynamics of heat exchange tube outlet falling film evaporator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 2021, 864, doi: 10.1063/5.0068409.
8. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V., Khomyakova T. V. Mathematical model of two-phase flow processes in heat exchange tubes of the falling film

- evaporator. *AIP Conference Proceedings*, 2021, 2388, doi: 10.1088/1755-1315/864/1/012037.
9. Nechyporenko D., Panasenko V., Novozhilova T. Study of the boiling process of solutions in the collapsible wide-channel plate heating chamber of the evaporating apparatus. *Proceedings of NDIOHIM*, 2010, 76, pp. 107–112.
 10. Matisse D., Zhabina I. Ways of reducing energy consumption during the evaporation of solutions in multi-body evaporation plants *X International scientific and practical student conference of master's students (April 05–08, 2016): conference materials: in 3 parts - Part 3 / edited by Prof. E. Sokol – Kharkiv: NTU "KhPI"*, 2016. P. 47–48.
 11. Mihaylichenko V., Rakova K. Ways to reduce energy consumption in the production of semi-sweet wines *XI International scientific and practical conference of master's and postgraduate students: conference materials, April 18–21, 2017: Part 3*. Kharkiv. NTU "KhPI", 2017. P. 27.
 12. Nechiporenko D., Yelizarov A. Intensification of the milk drying process Modern research in world science. *Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua"*. Lviv, Ukraine. 2023, pp. 308–311.
 18. Yu N., Hu H., Xia W., Zhao Z., & Cheng. Iron diselenide/carbon black loaded mushroom-shaped evaporator for efficiently continuous solar-driven desalination. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 658, pp. 238–246.
 19. de Paula C. H., Duarte W. M., Rocha T. T. M., de Oliveir, R. N., & Maia A. A. T. Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113, pp. 10–20.
 20. Xu J., Wang G., Zhu L., Jiang G., Lei Y., Zeng Z., & Xue L. Superwetting reduced graphene oxide/alginate hydrogel sponge with low evaporation enthalpy for highly efficient solar-driven water purification. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455, pp. 140704.
 21. Fan T., Lan S., & Li Y. Synergistic, Adaptive, Continuous-flow, and Low-carbon Solar Evaporation and Electrochemical Treatment (SEET) System—A Combined Numerical and Experimental Study. *Separation and Purification Technology*, 2023, 323, pp. 124354.
 13. Xie M., Zhang P., Cao Y., Yan Y., Wang Z., & Jin C. A three-dimensional antifungal wooden cone evaporator for highly efficient solar steam generation. *npj Clean Water*, 2023, 6(1), 12, doi: 10.1038/s41545-023-00231-3.

Відомості про авторів (About authors)

Нечипоренко Дмитро Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID:0000-0002-5570-1061; E-mail: Dmytro.Nechyporenko@khi.edu.ua.

Dmytro Nechiporenko – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID:0000-0002-5570-1061; E-mail: Dmytro.Nechyporenko@khi.edu.ua.

Новожилова Тетяна Борисівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID:0000-0003-2551-6954; E-mail: Tetiana.Novozhylova@khi.edu.ua.

Tatiana Novozhilova – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID:0000-0003-2551-6954; E-mail: Tetiana.Novozhylova@khi.edu.ua.

Сакун Антоніна Олегівна – доктор філософії в галузі екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; E-mail: baranova647@gmail.com.

Antonina Sakun – PhD, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID:0000-0002-1079-7856; E-mail: baranova647@gmail.com.

Пономаренко Євгенія Дмитрівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Інтегровані технології, процеси і апарати м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0004-0185-7644; E-mail: yevheniia.ponomarenko@khi.edu.ua.

Eugenia Ponomarenko – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor at the Department of Integrated Technologies, Processes and Equipment Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0004-0185-7644; E-mail: yevheniia.ponomarenko@khi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Нечипоренко Д. І., Новожилова Т. Б., Сакун А. О. Пономаренко Є. Д. Шляхи зниження енерговитрат а процеси випаровування розчинів у випарних апаратах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 58–64. doi: 10.20998/2413-4295.2024.01.08.

Please cite this article as:

Nechiporenko D., Novozhilova T., Sakun A., Ponomarenko E. Ways to reduce energy consumption in the evaporation process of solutions in evaporation apparatus. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 58–64, doi:10.20998/2413-4295.2023.01.08.

*Надійшла (received) 06.02.2024
Прийнята (accepted) 16.03.2024*

УДК 637.523:621.798.18

doi: 10.20998/2413-4295.2024.01.09

ПЕРЕДГІДРОЛІЗНІ ЗМІНИ ВОДОПОГЛИНАННЯ ЯЛОВИЧИХ ЧЕРЕВ ПІД ВПЛИВОМ КИСЛОТНОЇ ОБРОБКИ

В. М. ОНИЩЕНКО^{1*}, М. О. ЯНЧЕВА², А. В. ОНИЩЕНКО¹, С. Т. ІНЖИЯНЦ³

¹ кафедра технології м'яса, Державний біотехнологічний університет, Харків, УКРАЇНА

² факультет переробних і харчових виробництв, Державний біотехнологічний університет, Харків, УКРАЇНА

³ відділ виробництва сиров'ялених виробів, ТОВ «Чугуївський м'ясокомбінат», Чугуїв, УКРАЇНА

*e-mail: 0633126969@btu.kharkov.ua

АНОТАЦІЯ Показано перспективність розвитку інновацій з прямого використання залишків кишкової сировини, як знов створених склеєних ковбасних оболонок, емностей та багатофункціональних харчових плівок для іншої продукції, що відповідає принципам *Lean production*, зокрема ідентифікації та усуненні технологічних та інших втрат протягом життєвого циклу продукції. Розглянуто доцільність використання харчових кислот (молочної, оцтової, лимонної) для передгідролізої обробки кишкових плівок як попередньої підготовки перед дубленням задля ефективного забезпечення формування міцності їх когезійного шву. Акцентовано увагу, що ступінь передгідролізої змін може бути підтверджено зростанням водопоглинання кишкових плівок, основною складовою яких є колаген, як результат їх кислотної обробки. Набрякання, здебільшого, експериментально визначають за зміною об'єму або маси білку, або ж за зміною кількості рідини. Встановлено, що обробка водними розчинами молочної, лимонної та оцтової кислот (С% = 1,0–5,0 %) дозволяє збільшити водопоглинання фабрикатів яловичих черев у 1,23–2,45 рази залежно від обраних кислот та їх концентрацій. Інтенсивність прояву змін водопоглинання фабрикатів кишкових плівок пов'язана із концентрацією та рН кислотних розчинів. Ефективне підвищення водопоглинання характерне здебільшого у діапазоні рН 2,05–2,63. Висока активність набування значень водопоглинання характерна для перших 4–6 год. Зміни концентрації кислотних розчинів відчутніше впливають на збільшення водопоглинання в інтервалі 1,0–3,0 %. Відмічено, що до визначальних чинників раціонального вибору харчової кислоти, поряд із наведеними, належить економічна складова. На підставі одержаних даних та їх аналізу показано, що зміни водопоглинання фабрикатів яловичих черев під впливом обробки харчовими кислотами пов'язані з передгідролізої перетвореннями у їх колагеново-еластиновій структурі. Це є передумовою обґрунтування параметрів фізико-хімічної дії їх розпучення та доступності з метою реалізації локального дублення як способу досягнення необоротності процесу склеювання-розиарування та збільшення міцності зв'язку між шарами склеєних кишкових плівок багатофункціонального призначення.

Ключові слова: водопоглинання; черви яловичі; склеєні кишкові оболонки; колаген; харчові кислоти; передгідроліз.

PREHYDROLYSIS CHANGES OF BEEF ROUNDS WATER ABSORPTION UNDER THE ACID TREATMENT EFFECT

V. ONISHCHENKO¹, M. YANCHEVA², A. ONYSHCHENKO¹, S. INZHYYANTS³

¹ Department of Meat Technology, State Biotechnological University, Kharkiv, UKRAINE

² Faculty of Processing and Food Production, State Biotechnological University, Kharkiv, UKRAINE

³ Production department of uncooked unsmoked products, Ltd "Chuhuyivsky myasokombinat", Chuhuyiv, UKRAINE

ABSTRACT The research paper presents the prospects of innovations development for the direct use of casings raw materials residues as newly created glued sausage casings, containers and multifunctional food films for other products that meet *Lean production* principles, in particular, the identification and elimination of technological and other losses during the product life cycle. The expediency of food acids (lactic, acetic, citric) use for the pre-hydrolysis treatment of casing films as a preliminary preparation before tanning for providing more effectively formation of their collagen seam strength is considered. It is emphasized that prehydrolysis changes degree can be confirmed by casings films water absorption increasing, the main component of which is collagen, as a result of their acid treatment. Swelling is mostly determined experimentally by changes in protein volume or weight, or by changes in the amount of liquid. It is found that the treatment with aqueous solutions of lactic, citric, and acetic acids (C% = 1,0–5,0 %) can increase the water absorption of beef casings semi-products by 1,23–2,45 times, depending on the acids and their concentrations. The intensity of water absorption changes of casings film semi-products is related to the concentration and pH of acid solutions. Water absorption effective increasing occurs mainly in pH range of 2,05–2,63. High activity of water absorption increasing is characteristic during the first 4–6 hours. Acid solutions concentration changes have a more significant effect on the water absorption increasing in the range of 1,0–3,0 %. It is noted that the determining factors of the rational choice of food acid, along with the above mentioned, include the economic component. On the base of obtained data and their analysis, it is shown that water absorption changes of beef casings semi-products under the influence of food acid treatment are associated with pre-hydrolysis transformations in their collagen-elastin structure. This is a prerequisite for substantiating the parameters of the physical and chemical action of their dissolution and availability for local tanning implementation as a way to achieve of the bonding-delamination process irreversibility and bonds strengthening between the layers of glued casings films for multifunctional use increasing.

Keywords: water absorption; beef rounds; glued gut casings; collagen; food acids; prehydrolysis.

Вступ

Актуальність ресурсозбереження є історично неухитною, набуваючи у сучасних умовах,

пов'язаних з виснаженням природних джерел сировини, зростанням чисельності населення, особливо важливого значення, що ставить для

світових продовольчих систем завдання пошуку нових додаткових рішень з метою запобігання дефіциту продовольства [1].

У харчовій промисловості переважна більшість виробництв керується сьогодні низкою принципів ощадливого виробництва (Lean production), найпряміший за своєю сутністю з яких полягає в ідентифікації та усуненні технологічних та інших втрат протягом життєвого циклу продукції [2]. Безперечно очевидно, і з позиції натуральності, і враховуючи економічну ефективність залучення залишків невикористаної сировини з метою її залучення у харчовий потік, залишається перспективність ощадливої переробки сировини тваринного походження, зокрема у м'ясній промисловості та суміжних (коопераційних) галузях [3].

Значна частка браку та відходів у кишковому виробництві, а також в процесі виготовлення ковбасних виробів у натуральних оболонках, що сумарно може досягати 30 %, зумовлює доцільність створення відповідних ресурсозберігаючих технологій [4]. Сьогодні, поряд із технологіями глибокої переробки, як джерела білку колагену [5], інтерес представляє розвиток інновацій з більш прямого використання залишків кишкової сировини – як знов створених склеєних ковбасних оболонок, емностей та багатофункціональних харчових плівок для іншої продукції. При цьому, крім економічних чинників, пов'язаних із ефективністю додаткового використання незатребуваної раніше сировини, варто також звертати увагу на споживчі переваги, які полягають у прагненні вживати натуральне.

Специфіка техніко-технологічних рішення з отримання склеєних кишкових плівок пов'язана зі здатністю до міцного зчеплення їх шарів після висушування, з одного боку, а з іншого, внаслідок збереження нативних властивостей колагено-еластинової структури, оберненістю процесу їх склеювання-розшарування під впливом вологи [4].

Запропоновано технологію склеєних кишкових ковбасних оболонок, виготовлених зі свинячих черев, підданих локальній тепловій коагуляції, локальному та інтегральному рослинному дубленню [6]. При цьому такі рішення потребують удосконалення та доопрацювання для іншої кишкової сировини, зокрема яловичої, оскільки вона відрізняється за структурою, складом і товщиною.

Розроблено спосіб теплокоагуляційного зміцнення когезійного шва для одержання багатофункціональної кишкової плівки [7]. Таке рішення потребує додаткового обладнання, теплових витрат енергії.

Формування міцного зчеплення склеювальних поверхонь яловичих кишкових плівок залежить, крім інших чинників, від ступеня доступності колагену яловичої кишкової сировини задля ефективної дифузії та подальшого дублення як способу досягнення необоротності отриманого зшивання. Означених змін може завдати обмежена локальна обробка кислотами

(як харчовими – молочною, оцтовою, лимонною, щавлевою, винною, аскорбіною, так і тими, що використовуються у технології колагенових оболонок, – сірчаною, хлоридною, з подальшим промиванням) [8–10]. Біохімічні зміни складових кишкової сировини під впливом такої обробки можна охарактеризувати як передгідролізни.

Ступінь передгідролізних змін може бути підтверджено зростанням водопоглинання кишкових плівок, основною складовою яких є колаген, як результат їх кислотної обробки. Набрякання, здебільшого, експериментально визначають за зміною об'єму або маси білку, або ж за зміною кількості рідини [11,12].

Незважаючи на досить широкі дослідження з набрякання колагену під дією кислот та лугів, дані щодо впливу кислот на водопоглинання фабрикатів яловичих кишок на сьогодні відсутні.

Таким чином, дослідження передгідролізних змін водопоглинання яловичих черев під впливом кислотної обробки, є актуальними. Їх результати дозволять обґрунтувати параметри фізико-хімічної дії розпушення та доступності структури фабрикатів яловичих кишок задля подальших операцій з локального дублення як способу досягнення необоротності процесу склеювання-розшарування та збільшення міцності зв'язку між шарами, що склеюються.

Мета роботи

Мета роботи – визначення змін водопоглинання фабрикатів яловичих черев під впливом кислотної обробки.

Виклад основного матеріалу

У дослідженні використано кишкові плівки, отримані з фабрикатів яловичих черев (в результаті повної обробки, згідно із чинними технологічними інструкціями).

З метою досягнення передгідролізних змін кишкових плівок обрано харчові кислоти – молочну, лимонну та оцтову. Визначальними чинниками означеного вибору стали відомості з узагальнення фізико-хімічних основ кислотної обробки колагеновмісної сировини [13,14] та дозвіл до використання у харчовій промисловості. Зокрема спирались на той, факт, що кількість поглинутої колагеновою структурою вологи, серед з інших чинників, залежить від зміщення рН обводненого середовища у бік кислого від ізоелектричної точки колагену, що відповідає інтервалу рН від 6,36 до 6,75. Крім цього, враховано дані щодо кислотного гідролізу колагену з регульованим рН у технології желатину, а також рекомендації з дотримання граничних меж рН під час виготовлення білкових плівок для забезпечення їх необхідних функціонально-технологічних властивостей [5].

Вказані чинники дозволили спрогнозувати найбільш наближений до раціонального діапазон

водневого показника. Виходячи з цього, зміни водопоглинання вивчали під впливом водних розчинів кислот ($C\% = 1,0\%$, $2,0\%$, $3,0\%$, $4,0\%$, $5,0\%$), фіксуючи їх такі характеристики (відповідно):

– молочна кислота ($M = 90,08$ г/моль): $C_m = 0,11$; $0,22$; $0,33$; $0,44$; $0,55$; $pH = 2,43$; $2,29$; $2,19$; $2,12$; $2,08$; $pK = 1,38 \times 10^{-4}$;

– лимонна кислота ($M = 192,12$ г/моль): $C_m = 0,05$; $0,10$; $0,15$; $0,21$; $0,26$; $pH = 2,21$; $2,05$; $1,96$; $1,89$; $1,84$; $pK = 8,40 \times 10^{-4}$;

– оцтова кислота ($M = 60,05$ г/моль): $C_m = 0,17$; $0,34$; $0,50$; $0,67$; $0,83$; $pH = 2,79$; $2,63$; $2,54$; $2,48$; $2,43$; $pK = 0,18 \times 10^{-4}$.

Водопоглинання X (%) фабрикатів яловичих черев визначали як $(m_2 - m_1) \times 100 / m_1$, де m_1 – маса зразку перед зануренням у розчин (г), m_2 – маса зразку після експозиції у розчині (г). Час експозиції зразків у розчинах кислот складав $2,0$ – $12,0$ год., температура – 23 ± 2 °С (ГОСТ 4650). Піддані солінню кишкові плівки звільняли від солі та підготовлювали (розмочували).

Як видно (рис. 1), водопоглинання кишкових плівок, витриманих у розчинах харчових кислот, порівняно з первинним (нативним) станом, збільшується у всіх випадках. Визначений в рамках обраних концентрацій загальний ефект характеризується діапазоном збільшення водопоглинання від $23,2\%$ (оцтова кислота, $C\% = 1,0\%$) до $144,5\%$ (молочна кислота, $C\% = 5,0\%$).

Щодо часу експозиції кишкових плівок, максимальний ефект спостерігається на ділянці близько 6 год витримки. Про це свідчать вирівнювання кривих на рис. 1а (для розчинів оцтової кислоти), максимальні значення водопоглинання на рис. 1а, 1б. При цьому характер кривих, що характеризує динаміку водопоглинання у розчинах обраних концентрацій лимонної кислоти (рис. 1б), вказує на відносне прискорення змін, що полягає у досягненні максимальних значень $110,4$ – $140,2\%$ протягом 4–8 год експозиції, після чого спостерігається їх помітне зменшення (на 10 год – $118,9,5\%$, на 12 год – $113,4\%$).

Отримані дані показують, що згладжування кривих протягом кислотної обробки (на ділянці 6–12 год) та встановлення відповідно стабільних значень водопоглинання помітно виявляється у разі витримки кишкових плівок у розчинах оцтової кислоти. Проте ці значення коливаються лише від $23,2\%$ ($C\% = 1,0\%$) до $83,5\%$ ($C\% = 5,0\%$).

Обробка кишкових плівок розчинами молочної кислоти приводить до збільшення водопоглинання від $39,1\%$ до $144,5\%$. Вказане максимальне збільшення характерне протягом 6–10 год витримки, після чого (на 12 год витримки) дещо знижується (до $139,2\%$).

Щодо нарощування значень водопоглинання залежно від часу експозиції, здебільшого виявляється закономірність високої інтенсивності у перші 4 год

обробки. Зміна концентрації кислотних розчинів відчутніше впливає на збільшення водопоглинання, як видно з рис. 1, в інтервалі $1,0$ – $3,0\%$.

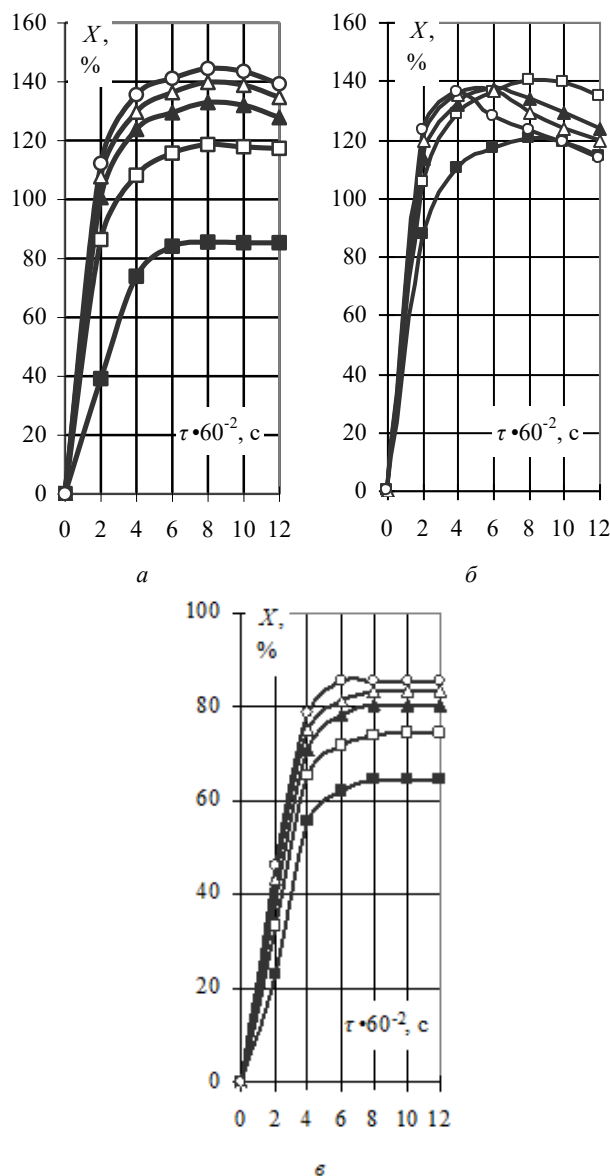


Рис. 1 – Зміни водопоглинання (X) фабрикатів яловичих черев під впливом обробки харчовими кислотами (а – молочна, б – лимонна, в – оцтова) залежно від часу експозиції (τ) та концентрацій розчинів кислот, %:
■ – 1,0; □ – 2,0; ▲ – 3,0; Δ – 4,0; ○ – 5,0

Обговорення результатів

Аналізуючи одержані результати, очевидним можна вважати факт підвищення водопоглинання фабрикату яловичих черев, основу структури яких складають колаген та еластин, залежно від виду та кількості доданих харчових кислот. Таке набрякання зумовлено зміненням заряду білка і може мати як оборотний, так і необоротний характер, що залежить від ступеня гідролітичних (передгідролітичних) змін, викликаних кислотною дією.

Як видно, набрякання колагеново-еластинової структури кишкових плівок у кислому середовищі зростає до певних меж, за подальшого збільшення концентрацій кислот – починає зменшуватись. Під дією кислот на складові кишкових плівок, серед яких колаген та еластин суттєво превалюють, виникає надлишковий заряд. Внаслідок цього компактна структура, стабілізована сольовими зв'язками, розпушується, оскільки відбувається розширення фібрил у полярних областях через відштовхування однойменно заряджених груп, а у розширені області потрапляє вода, що і є поясненням набрякання. Щодо зниження набрякання у надлишковій кількості електроліту, поясненням цього є зменшення ступеня дисоціації білку [13-15].

Як видно, рН розчинів обраних у даному дослідженні харчових кислот і їх концентрацій знаходиться у межах 1,84–2,79. При цьому ефективне підвищення водопоглинання кишкових плівок з яловичих через характерне здебільшого для розчинів досліджених кислот з рН 2,05–2,63. Більшою мірою це може бути пояснено тим, що утворення желатину за кислотним способом пов'язано із забезпеченням та контролюванням рН. Так, наприклад, за рН сировини менше за 2,3 колаген починає переходити у желатин, що негативно впливає на міцність та здатність до дублення білкових плівок. За рН більше 2,6 водопоглинання колагенової маси починає погіршуватись. Відносно невелику кількість часу досягнення дифузійної рівноваги (близько 6 год) зумовлено малою товщиною та пористою структурою плівок.

Висновки

Обробка водними розчинами молочної, лимонної та оцтової кислот ($C\% = 1,0\text{--}5,0\%$) дозволяє збільшити водопоглинання фабрикатів яловичих через у 1,23–2,45 рази (від 23,2% для розчину оцтової кислота за $C\% = 1,0\%$, до 144,5% – молочної за $C\% = 5,0\%$).

Інтенсивність прояву змін водопоглинання фабрикатів кишкових плівок пов'язана із концентрацією та рН кислотних розчинів. Ефективне підвищення водопоглинання характерне здебільшого у діапазоні рН 2,05–2,63. Висока активність нарощування значень водопоглинання характерна для перших 4 год експозиції та більше 6 год може визначатись недоцільною. Зміни концентрації кислотних розчинів відчутніше впливають на збільшення водопоглинання в інтервалі 1,0–3,0%. При цьому до визначальних чинників раціонального вибору харчової кислоти, поряд із наведеними, належить економічна складова.

Зміни водопоглинання фабрикатів яловичих через під впливом обробки харчовими кислотами пов'язані з передгідролізними перетвореннями у їх колагеново-еластиновій структурі. Це є передумовою обґрунтування у подальших дослідженнях параметрів фізико-хімічної дії їх розпушення та доступності з

метою реалізації локального дублення як способу досягнення необоротності процесу склеювання-розшарування та додаткового зміцнення когезійного шва склеєних кишкових плівок багатофункціонального призначення.

Список літератури

1. Sumsion R. M., June H. M., Cope M. R. Measuring Food Insecurity: The Problem with Semantics. *Foods*. 2023. 12 (9). 1816. doi: 10.3390/foods12091816.
2. Mrugalska B., Wyrwicka M. Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 182. P. 466–473. doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.135.
3. Клецов А. Й., Хюгі К., Хенгевосс Д., Масліков М. М. *Ресурсоефективне та чисте виробництво у м'ясній промисловості*. Київ: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2018. 68 с.
4. Михайлов В. М., Онищенко В. М., Пак А. О., Інжиянц С. Т. *Обґрунтування технології склеєних кишкових ковбасних оболонки, армованих тепловою коагуляцією і дубленням: монографія*. Харків: ДБТУ, 2022. 105 с.
5. Ahmad M. I., Li Y., Pan J., Liu F., Dai H., Fu Y., Huang T., Farooq S., Zhang H. Collagen and gelatin: Structure, properties, and applications in food industry (review). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 254, Part 3. 128037. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.128037.
6. Onishchenko V., Pak A. O., Goralchuk A., Shubina L., Bolshakova V., Inzhyyants S., Pak A. V., Domanova O. Devising techniques for reinforcing glued sausage casings by using different physical methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1/11 (109). P. 6–13.
7. Pak A., Onishchenko V., Yancheva M., Grynchenko N., Dromenko O., Pak A., Inzhyyants S., Onyshchenko A. Devising a technique and designing an apparatus for obtaining a multifunctional purpose film from intestinal raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol.3/11 (123). P. 6–15. doi:10.15587/1729-4061.2023.279008.
8. Joye I. J. Acids and bases in food. *Reference Module in Food Science. Encyclopedia of Food Chemistry*. 2019. P. 1–9. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.21582-5.
9. Berry S. K. Role of acidulants in food industry. *Journal of Food Science and Technology*. 2001. 38 (2). P. 93–104.
10. Suurs P., Barbut S. Collagen use for co-extruded sausage casings – A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 102. P. 91–101. doi: 10.1016/j.tifs.2020.06.011.
11. León-López A., Morales-Peñaloza A., Martínez-Juárez V. M., Vargas-Torres A., Zeugolis D. I., Aguirre-Álvarez G. Hydrolyzed collagen – sources and applications. *Molecules*. 2019. 24(22). 4031. doi: 10.3390/molecules24224031.
12. Майстренко Л. А., Юнгін О. С., Ластовецька Л. О. Екстрагування колагену з недублених відходів шкіряного виробництва. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. № 5 (289). С. 269–273. doi: 10.31891/2307-5732-2020-289-5-269-273.
13. Fratzl P. *Collagen: structure and mechanics*. New York: Springer Science+Business Media, LLC. 2008. 506 p. doi: 10.1007/978-0-387-73906-9.
14. Covington A. D., Wise W. R. *Tanning Chemistry: The Science of Leather*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2019. 685 p.
15. Lucarini M., Durazzo A., Sciubba F., Di Cocco M., Gianferri R., A. M., Santini A., Delfini M., Lombardi-Boccia G. Stability of the meat protein type I collagen: influence of

pH, ionic strength, and phenolic antioxidant. *Foods*. 2020. 9. 480. doi:10.3390/foods9040480.

References (transliterated)

1. Sumsion R. M., June H. M., Cope M. R. Measuring Food Insecurity: The Problem with Semantics. *Foods*, 2023, 12 (9), 1816, doi: 10.3390/foods12091816.
2. Mrugalska B., Wyrwicka M. Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 182, pp. 466–473, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.135.
3. Kleshchov A. Y., Khiuhi K., Khenhevoss D., Maslikov M. M. *Resursoefektyvne ta chyste vyrobnytstvo u miasnii promyslovosti [Resource-efficient and clean production in the meat industry]*. Kyiv. Tsentr resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva [Resource Efficient and Clean Production Center], 2018, 68 p.
4. Mykhailov V. M., Onishchenko V. M., Pak A. O., Inzhyants S. T. *Obgruntuvannia tekhnologii skleienykh kyshtkovykh kovbasnykh obolonok, armovanykh teploviu koahuliatsiiei i dublenniam [Justification of the technology of glued sausage casings reinforced by thermal coagulation and tanning: a monograph]*. Kharkiv. SBTU, 105 p.
5. Ahmad M. I., Li Y., Pan J., Liu F., Dai H., Fu Y., Huang T., Farooq S., Zhang H. Collagen and gelatin: Structure, properties, and applications in food industry (review). *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, Vol. 254, Part 3, 128037, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.128037.
6. Onishchenko V., Pak A. O., Goralchuk A., Shubina L., Bolshakova V., Inzhyants S., Pak A. V., Domanova O. Devising techniques for reinforcing glued sausage casings by using different physical methods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 1/11 (109), pp. 6-13.
7. Pak A., Onishchenko V., Yancheva M., Grynchenko N., Dromenko O., Pak A., Inzhyants S., Onyshchenko A. Devising a technique and designing an apparatus for obtaining a multifunctional purpose film from intestinal raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, Vol.3/11(123), pp. 6–15, doi:10.15587/1729-4061.2023.279008.
8. Joye I. J. Acids and bases in food. *Reference Module in Food Science. Encyclopedia of Food Chemistry*, 2019, pp. 1–9. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.21582-5.
9. Berry S. K. Role of acidulants in food industry. *Journal of Food Science and Technology*, 2001, 38 (2), pp. 93–104.
10. Suurs P., Barbut S. Collagen use for co-extruded sausage casings – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, Vol. 102, pp. 91–101, doi: 10.1016/j.tifs.2020.06.011.
11. León-López A., Morales-Peñaloza A., Martínez-Juárez V. M., Vargas-Torres A., Zeugolis D. I., Aguirre-Álvarez G. Hydrolyzed collagen – sources and applications. *Molecules*, 2019, 24 (22), 4031. doi: 10.3390/molecules24224031.
12. Maistrenko L. A., Yunhin O. S., Lastovetska L. O. Ekstrahuvannia kolahenu z nedublenykh vidkhodiv shkirianoho vyrobnytstva [Extraction of collagen from non-tanned waste of leather production]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu [Bulletin of Khmelnytskyi National University]*, 2020, no 5 (289), pp. 269–273, doi: 10.31891/2307-5732-2020-289-5-269-273.
13. Fratzl P. *Collagen: structure and mechanics*. New York. Springer Science+Business Media, LLC, 2008, 506 p. doi: 10.1007/978-0-387-73906-9.
14. Covington A.D., Wise W. R. *Tanning Chemistry: The Science of Leather*. Cambridge. Royal Society of Chemistry, 2019, 685p.
15. Lucarini M., Durazzo A., Sciubba F., Di Cocco M., Gianferri R., A. M., Santini A., Delfini M., Lombardi-Boccia G. Stability of the meat protein type I collagen: influence of pH, ionic strength, and phenolic antioxidant. *Foods*. 2020, 9, 480, doi:10.3390/foods9040480.

Відомості про авторів (About authors)

Онищенко В'ячеслав Миколайович – доктор технічних наук, доцент, Державний біотехнологічний університет, професор кафедри технології м'яса; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8357-2201; e-mail: 0633126969@btu.kharkov.ua.

Onishchenko Vyacheslav – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, State Biotechnological University, Professor of Department of Meat Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8357-2201; e-mail: 0633126969@btu.kharkov.ua.

Янчева Марина Олександрівна – доктор технічних наук, професор, Державний біотехнологічний університет, декан факультету переробних і харчових виробництв; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9608-0724; e-mail: ya.marina11@gmail.com.

Yancheva Maryna – Doctor of Technical Sciences, Professor, State Biotechnological University, Dean of Faculty of Processing and Food Production; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9608-0724; e-mail: ya.marina11@gmail.com.

Онищенко Артем В'ячеславович – Державний біотехнологічний університет, аспірант; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0008-4130-5368; e-mail: 16Neverhood1994@gmail.com.

Onyshchenko Artem – State Biotechnological University, postgraduate student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0008-4130-5368; e-mail: 16Neverhood1994@gmail.com.

Інжиянц Самвел Тігранович – ТОВ «Чугуївський м'ясокомбінат», старший технолог виробництва сиров'ялених виробів, Харківська обл., м. Чугуїв, Україна; ORCID: 0000-0001-8784-262X; e-mail: samvel123@gmail.com.

Inzhyants Samvel – Ltd “Chuhuyivskyy myasokombinat”, senior production technologist of uncooked unsmoked products, Kharkiv region, Chuguyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8784-262X; e-mail: samvel123@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Онищенко В. М., Янчева М. О., Онищенко А. В., Інжиянц С. Т. Передгідролізні зміни водопоглинання яловичих черев під впливом кислотної обробки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 65-69. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.09.

Please cite this article as:

Onishchenko V., Yancheva M., Onyshchenko A., Inzhyants S. Prehydrolysis changes of beef rounds water absorption under the acid treatment effect. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 65-69, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.09.

*Надійшла (received) 12.02.2024
Прийнята (accepted) 15.03.2024*

УДК 633.85:581.145.2:663.916

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.10

РОЗРОБКА РЕЦЕПТУРИ ГРИЛЬЯЖНИХ ЦУКЕРОК НА ОСНОВІ НАСІННЯ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

Н. А СОВА^{*}, Н. В. КОВАЛЕНКО

Кафедра харчових технологій, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, УКРАЇНА

^{*}e-mail: sova.n.a@dsau.dp.ua

АНотація До структури харчової промисловості входить значна кількість галузей, де не останню роль відіграє кондитерська. Переважна кількість вітчизняних споживачів солодощів стверджують, що найулюбленішими серед кондитерських виробів є ті, які у своєму складі мають різноманітні горіхи. Істотним недоліком більшості груп кондитерських виробів є їх низька фізіологічна цінність. Один із шляхів підвищення якості харчових продуктів, у тому числі і кондитерських виробів, – використання нових нетрадиційних видів рослинної сировини. Основою грильяжних цукерок є насіння арахісу. Але, як відомо, насіння арахісу має в своєму складі компоненти, які можуть виступати алергенами, тому його заміна у рецептурах харчових продуктів на іншу біологічно цінну сировину є важливим завданням сучасної кондитерської галузі. Розроблено рецептури грильяжних цукерок на основі насіння олійних культур. Проведено асортиментний аналіз грильяжних цукерок вітчизняного виробництва. У якості основної сировини обрано насіння льону, кунжуту, голозерного гарбуза, а також ядро соняшникового та конопляного насіння. Проведено органолептичний аналіз і дегустаційну оцінку одержаних грильяжних цукерок. Зроблено порівняльний аналіз за складом контрольного та дослідних зразків грильяжних цукерок. Порівняння контрольного зразка грильяжної цукерки, виготовленої з арахісу та грильяжної цукерки з конопляного ядра показало, що вміст протеїну в конопляній цукерці всього на 0,5 % менший порівняно з контролем, жиру – менший на 7 %, клітковини – на 2,5 % більше. Щодо вмісту макроелементів, то у дослідному зразку грильяжної цукерки на основі смаженого конопляного ядра в 3 рази більший вміст магнію (3,07 г/кг), в порівнянні з контролем, а також в 3,5 рази більший вміст фосфору (6,46 г/кг). Вміст кальцію і натрію в обох зразках майже однаковий. Щодо вмісту мікроелементів у конопляній цукерці, відзначимо, що кожен з показників значно перевищував показники контролю, а саме: залізо – у 1,7 рази, цинк – у 2,3 рази, мідь – у 2,2 рази, марганець – у 5,1 разів. Перераховані мікроелементи сприятливо впливають на організм людини. Рекомендовано до впровадження рецептуру грильяжної цукерки на основі конопляного ядра. Розраховано її поживну (г/100 г: білків – 13,2; жирів – 24,67; вуглеводів – 45,98) та енергетичну цінність (450 кКал/100 г). Завдяки функціональним властивостям конопляного ядра готовий кондитерський виріб варто віднести до продуктів оздоровчо-профілактичного призначення.

Ключові слова: грильяжні цукерки; насіння арахісу; насіння льону; насіння кунжуту; насіння гарбуза; соняшникове ядро; конопляне ядро.

DEVELOPMENT OF A RECIPE FOR GRILLAGE CANDY BASED ON OIL SEEDS

N. SOVA^{1*}, N. KOVALENKO¹

¹ Department of Food Technologies, Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, UKRAINE

ABSTRACT A significant drawback of most groups of confectionery products is their low physiological value. One of the ways to improve the quality of confectionery products is the use of new non-traditional types of plant raw materials. The base of grillage candies is peanut seeds. But, as you know, peanut seeds contain components that can act as allergens. Therefore, its replacement in the recipes of food products with other biologically valuable raw materials is an important task of the modern confectionery industry. The purpose of the research is to develop a recipe for grillage candies based on oilseeds (sunflower, flax, sesame, pumpkin, hemp kernel), which is characterized by the content of biologically valuable elements, to increase the range of candy confectionery products, aimed at consumers who are interested in the topic of healthy nutrition. The recipe for grillage candy based on peanut seeds was chosen as the prototype for the research. In the recipe of the prototype, peanut seeds were completely replaced by seeds of oil crops, namely pumpkin, sunflower, sesame, flax, hemp. Two experimental samples were made from the seeds of each culture: one from raw seeds, one from roasted seeds. Assortment analysis of grillage candies of Ukrainian production was carried out. It was established that the main raw material base for their production is peanut seeds (66.7% of the analyzed raw materials), sunflower seeds are sometimes used. Ukrainian manufacturers use granulated sugar, honey, molasses, dried fruits, vanillin, confectionery glaze, etc. as additional raw materials. An organoleptic analysis and a tasting evaluation of the obtained grillage candies were carried out. Organoleptic quality indicators were determined by the following indicators: appearance, shape, taste and smell. All experimental samples of grillage candies met the requirements for all indicators according to the regulatory documentation, except for samples No. 2, No. 2a and No. 6a, which did not meet the requirements for taste qualities. The organoleptic indicators of the quality of finished products were determined using a point assessment. All experimental samples of grillage candies received a sufficiently high score. According to the obtained data, the samples No. 2 and No. 2a, in which the main component was pumpkin seeds, received the lowest score. Sample No. 3, in which flax seeds were used, received the highest rating. A comparative analysis of the composition of control and experimental samples of grillage candies was made. A comparison of a control sample of a grillage candy made from peanuts and a grillage candy made from hemp kernels showed that the protein content of the hemp candy is only 0.5% less compared to the control, fat – 7% less, and fiber – 2.5% more. As for the content of macroelements, in the experimental

sample of grillage candy based on roasted hemp kernel, the magnesium content is 3 times higher (3.07 g/kg), compared to the control, as well as the phosphorus content is 3.5 times higher (6.46 g /kg). The content of calcium and sodium in both samples is almost the same. Regarding the content of trace elements in hemp candy, we note that each of the indicators significantly exceeded the control indicators, namely: iron – by 1.7 times, zinc – by 2.3 times, copper – by 2.2 times, manganese – by 5, 1 times. The listed trace elements have a beneficial effect on the human body. A recipe for grillage candy based on hemp kernels is recommended for implementation. Its nutritional value (g/100 g: proteins – 13.2; fats – 24.67; carbohydrates – 45.98) and energy value (450 kcal/100 g) were calculated. Due to the functional properties of the hemp kernel, the finished confectionery product should be classified as a health and preventive product.

Key words: grillage candy; peanut seeds; flax seeds; sesame seeds; pumpkin seeds; sunflower kernel; hemp kernel.

Вступ

Кондитерська галузь має високий потенціал до розвитку. Її надзвичайно широкий асортимент продукції може здивувати кожного. Товари кондитерської галузі, які ми можемо побачити на полицях супермаркетів у величезному асортименті це: цукристи кондитерські вироби, шоколад та шоколадні вироби, борошняні кондитерські вироби. Проте основним недоліком більшості кондитерських виробів є їх низька фізіологічна цінність [1].

Популярною групою товарів серед солодоців є цукерки. Вони посідають друге місце після борошняної кондитерської продукції. Виробництво цукерок забезпечує стрімкий розвиток кондитерської галузі. Вони користуються попитом серед майже всіх груп населення, включаючи дітей та літніх людей. Асортимент цукерок дуже різноманітний: шоколадні, карамельні, желейні, вафельні, помадні, грильязні, молочні, марципанові, льодяникові. На сьогодні важливим питанням є збагачення цукерок компонентами, котрі можуть надати їм оздоровчих властивостей. Як варіант, в технології цукерок можна використати насіння олійних культур (соняшнику, льону, кунжуту, тощо), адже цей вид сировини є у вільному доступі для вітчизняних операторів ринку і має широкий спектр дії на організм людини. Наприклад, насіння соняшнику, гарбуза легко перетравлюється та гарно засвоюється організмом людини. Насіння льону містить вітамін F, який не може самостійно синтезуватися організмом, а насіння промислових конопель містить всі незамінні аміно- та жирні кислоти. Насіння кунжуту теж містить біологічно-активні речовини. Насіння олійних культур можна застосувати у якості сировини в технології приготування грильязних та марципанових цукерок.

Грильязні маси умовно поділяють на три види: твердий, м'який та фруктовий, кожен із яких має свої особливості. Основою твердої грильязної маси (97,7–99,3 % сухих речовин) є попередньо обсмажені горіхи (не менше 30 %), які з'єднані з розплавленим цукром. У масі м'якого грильязу (95,5–96,5 % сухих речовин) використовують цукрово-медовий або цукрово-патоковий сироп з подальшим додаванням горіхів. У складі фруктового грильязу (вміст сухих речовин 88–92 %) присутня уварена фруктово-цукрова маса та подрібнені горіхи у кількості 18–40 % [2].

Цукерки виготовляють відповідно до вимог ДСТУ 4135:2021 «Цукерки. Загальні технічні умови»,

додатково орієнтуючись на діючі нормативно-правові документи України про безпечність харчових продуктів та показників їх якості.

Процес виробництва цукерок еволюціонував від ручних операцій до повністю автоматизованих виробничих ліній. Обладнання на багатьох сучасних підприємствах з виробництва цукерок часто має високий рівень автоматизації, керується комп'ютером та має зручний інтерфейс із сенсорним екраном. Але виробництво цукерок – це динамічний, змінний у часі, складний фізико-хімічний процес. Узагальнюючи технологічний процес виготовлення цукерок, можна виділити наступні основні операції: виготовлення цукеркових мас, формування цукеркових корпусів, обробка поверхні, пакування [3]. Але технології деяких цукерок мають свої відмінності.

Через низький вміст біологічно активних складових у цукерках, виготовлених за традиційною рецептурою, постає питання їх збагачення з метою надання їм оздоровчих властивостей. Вчені активно вивчають це питання і використовують у своїх дослідженнях найрізноманітнішу сировину: овочеві, ягідні та фруктові пюре [4, 5, 6], шрот [4], насіння чіа [4], сухофрукти, горіхи тощо. На нашу думку, мало уваги сучасні вчені приділяють використанню насіння олійних культур у технологіях кондитерських виробів.

Мета роботи

На підставі аналізу вивчених джерел інформації сформульовано мету дослідження – розроблення рецептури грильязних цукерок на основі насіння олійних культур, яке характеризується підвищеним вмістом біологічно цінних елементів, для збільшення асортименту цукеркових кондитерських виробів, орієнтованих на споживачів, яким цікава тема здорового харчування. Для досягнення мети визначено наступні задачі: проаналізувати асортимент грильязних цукерок вітчизняного виробництва; виготовити дослідні зразки грильязних цукерок на основі насіння олійних культур; провести аналіз органолептичних показників дослідних зразків; визначити показники складу та якості обраного після дегустації дослідного зразка, порівняти його з контрольним зразком; визначити енергетичну й поживну цінність дослідних зразків грильязних цукерок та порівняти її з виробничими зразками.

Матеріали і методи дослідження

Основну масу грильжних цукерок складають горіхи, а саме: арахіс, мигдаль, фундук, волоський та інші. Білковий склад насіння арахісу представлений глобулінами (арахіном, конарахіном та глютеніном). Біологічна цінність його білків пов'язана з вмістом есенціальних амінокислот. Олія арахісу містить 80 % ненасичених жирних кислот, серед яких найбільшу частку займають олеїнова та ліолева. Але згідно даних Американської Академії Алергії, Астми і Імунології, арахіс входить у список алергенів та посідає друге місце [7, 8]. Це і спонукає нас знайти шляхи заміни арахісу іншою олійною неалергенною сировиною.

Взявши до уваги дані літературних джерел щодо цінного складу насіння олійних культур (табл. 1), нами визначено перспективну сировину для проведення досліджень, а саме насіння соняшнику, льону, конопель, гарбуза та кунжуту.

Таблиця 1 – Характеристика складу насіння олійних культур, обраних для дослідження [9–21]

№ з/п	Компонент	Вміст у насінні					
		арахісу	соняшнику	конопель	льону	кунжуту	гарбуза
1	Білки, %	15–34	14–20	20–28	18–33	19–27	30–43
2	Жири, %	44–56	43–58	25–35	30–50	48–65	17–55
3	Вуглеводи, %	6–37	17–24	20–30	12–28	16–20	10–20
Макроелементи, мг/100 г:							
4	Фосфор	1220–1411	711–1478	-	400–642	700	1–48
5	Кальцій	38–48	90–650	144–955	180–255	975–1200	1–10
6	Магній	67–82	10–165	237–694	1–9	344–521	67–540
7	Натрій	199–342	156–254	-	20–30	32–75	15–170
Мікроелементи, мг/100 г:							
8	Залізо	12–16	6–39	1133–2400	4–6	9–69	4–8
9	Мідь	-	2,3	-	0,5–1	19–150	0,03–1
10	Марганець	-	3	63–110	2–5	2,5–17	0,7–1,5
11	Цинк	2–3	28–78	42–94	4–64	4–10	7–14
Вітаміни, мг:							
12	РР	10–19	-	4	4	-	-
13	Е	6–10	30–60	56–58	9	1–50	21
14	С	2–5	-	7	0,5	0,5	10–40
15	В ₉	145–240	151	36	-	94	-
16	В ₆	0,2–0,3	0,5	-	0,6	0,8	-
17	В ₃	2–13,5	4,5	-	1–3	-	-
18	В ₂	0,09–0,1	-	0,07	0,07–0,2	0,2–6,3	0,15
19	В ₁	0,4–0,7	-	1,2	0,2–2,2	0,2–1,3	0,3

Як додаткову сировину використано патоку, цукати, мед, курагу, сушену журавлину, родзинки, гліцерин, сіль, ванілін, кондитерську глазур. Якість використаної сировини відповідала вимогам діючої нормативної документації.

За прототип для проведення дослідження обрано рецептуру грильжної цукерки на основі насіння арахісу. У рецептурі прототипу повністю замінювали насіння арахісу насінням олійних культур, а саме гарбуза, соняшнику, кунжуту, льону, конопель. Із насіння кожної культури виготовляли по два дослідні зразки: один – із сирого насіння, один – зі смаженого. У результаті одержано 11 дослідних зразків грильжних цукерок:

- 1) зразок 1* – контрольний зразок – з насіння арахісу;
- 2) зразок 2 – з обсмаженого насіння гарбуза;
- 3) зразок 3 – з обсмаженого насіння льону;
- 4) зразок 4 – з обсмаженого соняшникового ядра;
- 5) зразок 5 – з обсмаженого насіння кунжуту;
- 6) зразок 6 – з обсмаженого конопляного ядра;
- 7) зразок 2а – з насіння гарбуза;
- 8) зразок 3а – з насіння льону;
- 9) зразок 4а – з соняшникового ядра;
- 10) зразок 5а – з насіння кунжуту;
- 11) зразок 6а – з конопляного ядра.

Виготовлення зразків грильжних цукерок включало наступні стадії: підготовку сировини, приготування клейового сиропу та цукерної маси, перемішування до однорідного стану, формування заготовок, глазурування.

Підготовка сировини передбачала зважування усіх компонентів та обсмажування насіння олійних культур. Приготування клейового сиропу складалося з декількох стадій. Спочатку патоку підігрівали до температури 50 °С, після чого додавали мед, жировий компонент, гліцерин, сіль харчову і лецитин та уварювали суміш до 118 °С. Далі готували цукерну масу (подрібнювали у блендері та змішували арахіс/насіння олійних культур, сухофрукти, ванілін). Далі з'єднували клейовий сироп з цукерною масою, перемішували до однорідного стану, формували заготовки та відправляли їх на охолодження. Після охолодження заготовки глазурували.

Визначення показників якості грильжних цукерок на відповідність ДСТУ 4135:2021 «Цукерки. Загальні технічні умови» проводили згідно з діючими державними стандартами, у яких зазначені відповідні методики.

Виклад основного матеріалу

За думкою аналітиків нині все більша кількість сучасних українців переходить на здоровий спосіб харчування. Завдяки новій тенденції щодо здорового способу життя, перспектива ринку вітчизняних натуральних солодоців стрімко розвивається [22]. Значний попит на цукерки обумовлює необхідність до коригування їхнього хімічного складу шляхом розробки нових або удосконалення існуючих рецептур.

Аналізуючи асортимент грильяжних цукерок українського виробництва, можна відмітити, що основна сировинна база для їх виготовлення – це насіння арахісу (66,7 % проаналізованої сировини), іноді зустрічається використання насіння соняшнику (рис. 1). У якості додаткової сировини вітчизняні виробники застосовують цукор-пісок, мед, патоку, сухофрукти, ванілін, глазур кондитерську тощо.

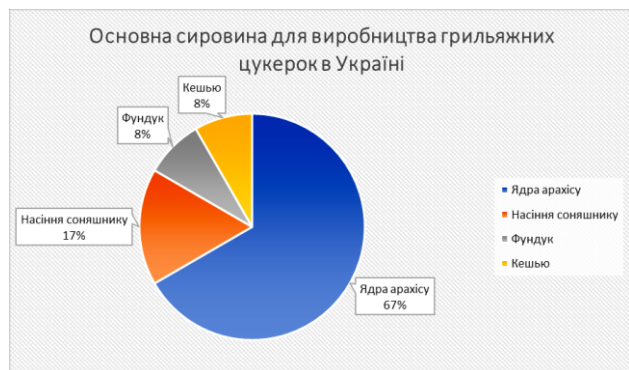


Рис. 1 – Аналіз основної сировини для виробництва грильяжних цукерок

Необхідним є розширення вітчизняного асортименту грильяжних цукерок. Оскільки насіння арахісу відносять до продуктів, які мають в своєму складі алергени, необхідним є пошук його заміників. Для цього є всі сировинні можливості і виробники з легкістю знайдуть вид сировини, яка буде задовольняти кінцевого споживача. Перспективною сировиною для збагачення традиційних харчових продуктів, в тому числі грильяжних кондитерських виробів, є насіння соняшнику, гарбуза, кунжуту, промислових конопель та льону, які не досить часто використовують вітчизняні виробники. Перерахована сировина має унікальний хімічний склад та профілактичні властивості.

Насіння гарбуза володіє протизапальною, лактаційною, сечогінною та легкою послаблюючою дією. Схожі властивості має кунжутне насіння: загальнозмощнюючу, тонізуючу та протизапальну дію. Насіння льону використовують при профілактиці та лікуванні серцево-судинних, шлунково-кишкових і навіть онкологічних захворювань. Склад насіння промислових конопель відіграє роль у зниженні ризику хронічних захворювань (нейродегенеративні захворювання, онкологія, ліпідний обмін, захворювання серцево-судинної системи, імуномодельючий ефект, шлунково-кишкові розлади, дерматологічні захворювання). Насіння соняшнику характеризується високою антиоксидантною, антигіпертензивною, протизапальною, заспокійливою (болі, кровоносні судини, нерви, м'язи) протипухлинною, шкірозахисною та антибактеріальною дією [23].

Не менш важливими інгредієнтами у рецептурах грильяжних цукерок є сухофрукти. Вони містять у своєму складі значну кількість вітамінів,

антиоксидантів та харчових волокон. Журавлину вживають як протигарячковий засіб, при запальних захворюваннях, вітамінозах, для лікування гастритів, для посилення дії антибіотиків. Курагу використовують для попередження та лікування анемії, захворювань щитовидної залози, гіпертонії, порушень в роботі шлунково-кишкового тракту. Родзинки характеризуються вмістом бору, що незамінний для запобігання остеопорозу, оскільки допомагає організму правильно використовувати та зберігати кальцій [24].

Запропоновані рецептури грильяжних цукерок на основі олійних культур наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Рецептури грильяжних цукерок на 100 г готового продукту

№ з/п	Сировина	Вміст в рецептурі, г	
		прототипу	зразку на основі насіння олійних культур
1	Насіння арахісу	31	-
2	Насіння олійних культур	-	34,1
3	Патока	24	24,4
4	Цукати	17	-
5	Сухофрукти (журавлина, курага, родзинки)	-	17,05
6	Жировий компонент	3	-
7	Вода	3	3
8	Мед	2,5	2,5
9	Гліцерин	2	2
10	Мальтодекстрини	0,4	-
11	Сіль харчова	0,3	0,3
12	Лецитин	0,1	-
13	Ароматизатор	0,05	-
14	Ванілін	0,02	0,02
15	Глазур кондитерська	16,63	16,63

Безпосередньо після виготовлення цукерок (рис. 2) провели дослідження їх якості.

Результати та їх обговорення

Органолептичні показники якості визначали за наступними показниками: зовнішній вигляд, форма, смак та запах. Всі дослідні зразки грильяжних цукерок відповідали вимогам за всіма показниками згідно ДСТУ 4135:2021 «Цукерки. Загальні технічні умови», окрім зразків №2, №2а та №6а, що не задовольняли вимоги ДСТУ за смаковими якостями. Далі вирішено встановити органолептичні показники якості готових виробів з використанням бальної оцінки. Всі дослідні зразки грильяжних цукерок отримали достатньо високий бал. За одержаними даними найменшу бальову оцінку отримали зразки №2 та №2а, у яких основним компонентом було гарбузове насіння. Найвищу оцінку отримав зразок №3, у якому використали лляне насіння (рис. 3).

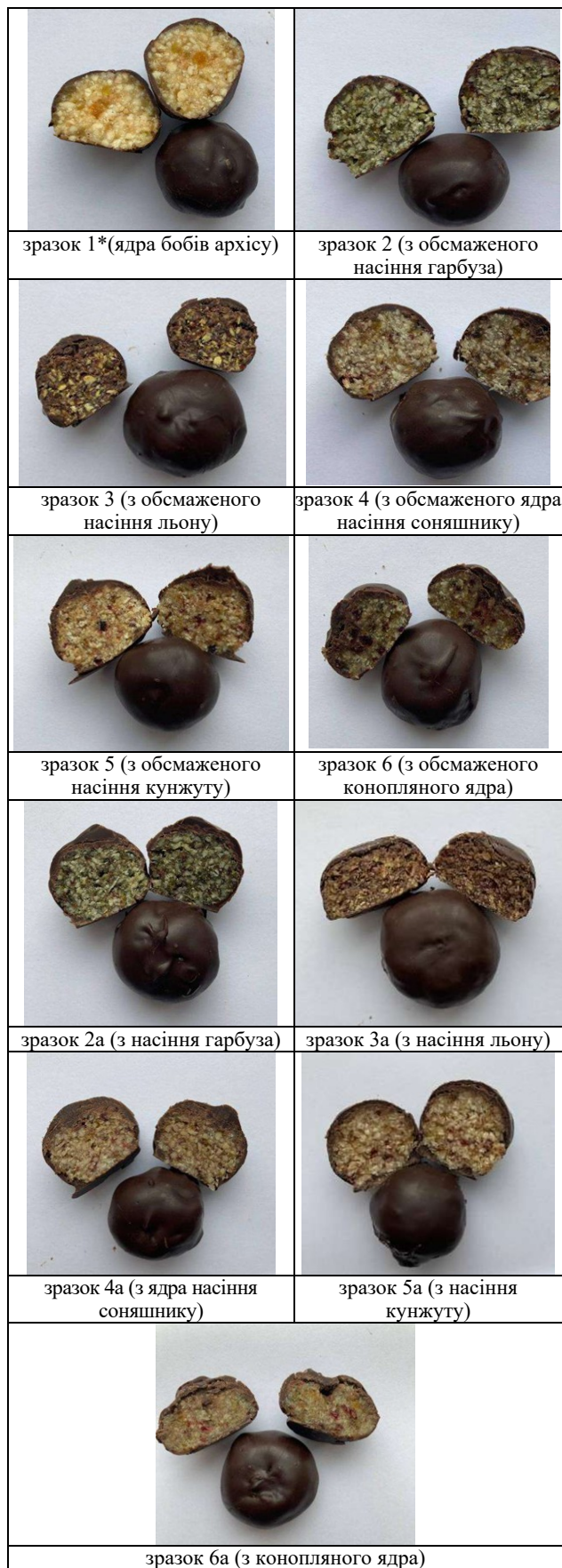


Рис. 2 – Загальний вигляд готових виробів дослідних зразків грильяжних цукерок

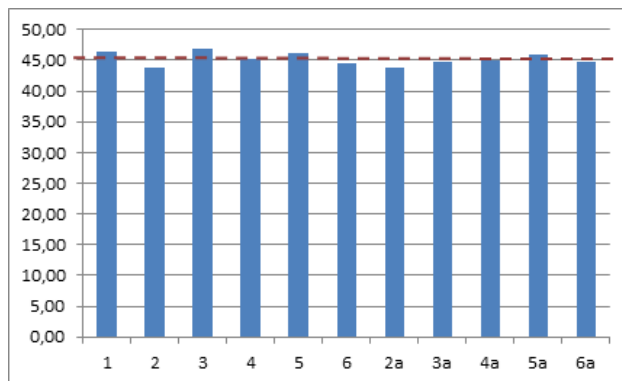


Рис. 3 – Загальна органолептична оцінка зразків грильяжних цукерок

Визначено вміст вологи, протеїну, жирів, клітковини, мікро- та макроелементів контрольного зразку (прототипу) та дослідних зразків грильяжних цукерок №3, 5 та 6, які отримали найвищі бали (табл. 3).

Таблиця 3 – Характеристика показників якості зразків грильяжних цукерок

№ з/п	Показники, що визначали	Фактичне значення у зразку**			
		№1*	№3	№5	№6
1	вологи	9,27	10,43	11,01	11,36
2	протеїну	13,74	10,84	11,18	13,20
3	жиру	32,11	25,90	22,35	24,67
4	клітковини	3,14	11,76	12,69	5,60
макроелементів:					
5	Кальцію, г/кг	0,77	0,78	0,80	0,80
6	Магнію, г/кг	0,95	1,64	1,45	3,07
7	Натрію, %	0,18	0,11	0,12	0,15
8	Фосфору, г/кг	1,74	2,87	2,76	6,46
мікроелементів, мг/кг:					
9	Заліза	43,63	65,55	56,67	73,15
10	Цинку	17,74	26,93	22,01	41,67
11	Міді	3,71	7,68	7,27	8,04
12	Марганцю	6,95	14,39	7,85	35,48

Примітка: ** зразок 1* – контрольний зразок – з насіння арахісу;
зразок 3 – з обсмаженого насіння льону;
зразок 5 – з обсмаженого насіння кунжуту;
зразок 6 – з обсмаженого конопляного ядра.

Аналізуючи таблицю 3 слід відзначити, що за вмістом протеїну та клітковини найбільш наближеною до прототипу є цукерка з конопляним ядром, а за вмістом жиру – з насінням льону. Щодо вмісту мікро- та макроелементів, то лідером за вмістом кальцію, магнію, марганцю, фосфору, заліза, цинку та міді є цукерка з конопляним ядром, яка набрала не найкращі бали з органолептичної оцінки. Це було пов'язано з смаковими якостями використаної на той момент сировини. Тому вирішено обрати для впровадження грильяжні цукерки на основі смаженого конопляного ядра, але велику увагу

слід приділяти якості вихідної сировини. Після заміни у рецептурі насіння промислових конопель на перевірене і якісне, смакові якості конопляних цукерок були на багато кращими порівняно з першим сенсорним дослідженням.

Вміст протеїну в конопляній цукерці всього на 0,5 % менший порівняно з контролем, жиру – менший на 7 %, клітковини – на 2,5 % більше. Щодо вмісту макроелементів, відзначимо в 3 рази більший вміст магнію (3,07 г/кг) у цукерці на основі смаженого конопляного ядра, в порівнянні з контролем, а також в 3,5 рази більший вміст фосфору (6,46 г/кг). Вміст кальцію і натрію в обох зразках був майже однаковий. Магній сприятливо діє на нормалізацію збудливості нервової системи, функціональність кровопостачання серця та його стан м'язів. Фосфор бере важливу участь в обмінних процесах (в обміні білків, жирів та вуглеводів) [25]. 100 г конопляної грильяжної цукерки забезпечує добову потребу у магнії.

Особливо відмітимо мікроелементи дослідного зразка №6, оскільки кожен з показників значно перевищує показники контролю, а саме: залізо – у 1,7 рази, цинк – у 2,3 рази, мідь – у 2,2 рази, марганець – у 5,1 разів. Перераховані мікроелементи відіграють важливу роль в організмі людини, а саме: активують синтез гемоглобіну, інсуліну та дозрівання еритроцитів, мають антиоксидантну дію, беруть участь у процесах кровотворення та загоєння ран, стимулюють процеси росту, вони необхідні для діяльності наднирників, гіпофізу тощо [25].

Порівняльна характеристика поживної та енергетичної цінностей дослідних зразків №1 і №6 з виробничим зразком грильяжних цукерок наведена в табл. 4.

Таблиця 4 – Порівняння дослідних зразків з виробничим зразком грильяжних цукерок

Торгова марка	Виробник	Вміст			Енергетична цінність, кКал/100 г
		білків, г/100 г	жирів, г/100 г	вуглеводів, г/100 г	
Фантазія	ТОВ «Фантазія», м. Львів	2,4	12,1	57,3	351
Дослідний зразок №1		13,74	32,11	36,3	482
Дослідний зразок №6		13,20	24,67	45,98	450

Порівнявши дані таблиці 4, видно, що дослідні зразки №1 та №6 переважають виробничий зразок за вмістом білків, жирів та вуглеводів. Як наслідок енергетична цінність зразків №1 та №6 вища, ніж у виробничого зразка.

Висновки

Підводячи підсумки, а саме результати органолептичної оцінки дослідних зразків грильяжних цукерок, визначення їх показників якості,

порівняння з виробничим зразком, нами рекомендовано до впровадження зразок №6 – грильяжну цукерку на основі обсмаженого конопляного ядра. Вивчивши склад конопляної цукерки, можна віднести її до групи харчових продуктів з оздоровчими властивостями.

Список літератури

1. Півень О. М. Оптимізація рецептурного складу та деяких споживчих властивостей гречаних цукерок. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. 2020. №6. С. 71–76. doi: 10.20998/2220-4784.2020.06.11.
2. Кучерук З. І., Шматченко Н. В. *Технологія кондитерських виробів: навч. посіб.* Харків. ХДУХТ, 2020. 179 с.
3. Stephen St. Beckett *Science of Chocolate*. UK. York, 2019. 205 p.
4. Спосіб виробництва цукерок типу м'якого грильяжу на основі продуктів переробки гарбуза: пат. 149722 Україна: МПК (2021.01) A23G 3/00. № u 2021 03768; заявл. 01.07.2021; опубл. 01.12.2021, Бюл. 48.
5. Цукерки оздоровчого спрямування «Насточка»: пат. 139876 Україна: МПК (2020/1) A23G 3/00. № u 2019 07311; заявл. 01.07.2019; опубл. 27.01.2020, Бюл. №2.
6. Помадно-кремові цукерки «Аронія»: пат. 131288 Україна: МПК A23G 3/00. № u 2018 07498; заявл. 04.07.2018; опубл. 10.01.2019, Бюл. №1.
7. Романова С. В., Демешко О. В., Михайленко О. О., Волочай В. І., Козира С. А., Дученко М. А. Біологічно активні речовини арахісу культурного. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «PLANTA+. НАУКА, ПРАКТИКА ТА ОСВІТА». 19 лютого 2021 року*, Київ. С. 165–169.
8. Семко Т. В., Іваніщева О. А. Харчова алергія. *Новачі в технології та обладнанні готельно-ресторанних, харчових і переробних виробництв*: міжнародна науково-практична інтернетконференція. 24 листопада 2020 р. Мелітополь. ТДАТУ, 2020 р. С. 217–219.
9. Bonku R., Yu J. Health aspects of peanuts as an outcome of its chemical composition. *Food Science and Human Wellness*. 2020. Vol. 9, Issue 1. P. 21–30. doi: 10.1016/j.fshw.2019.12.005.
10. Oliveira Filho J. G. de, Egea M. B. Sunflower seed byproduct and its fractions for food application: An attempt to improve the sustainability of the oil process. Concise reviews & hypotheses in food science. *Journal of Food Science*. 2021. Vol. 86, Issue 5 P. 1497–1510. doi: 10.1111/1750-3841.15719.
11. Crescente G., Piccolella S., Esposito A., Scognamiglio M., Fiorentino A., Pacifico S. Chemical composition and nutraceutical properties of hempseed: an ancient food with actual functional value. *Phytochemistry Reviews*. 2018. Vol. 17, Issue 4. P. 733–749. doi: 10.1007/s11101-018-9556-2.
12. Xu J., Bai M., Song H., Yang L., Zhu D., Liu H. Hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) Chemical Composition and the Application of Hempseeds in Food Formulations. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2022. Vol. 77. P. 504–513. doi: 10.1007/s11130-022-01013-x.
13. Poliakova I., Sinyayeva N., Lyakh V. Specific features of the trace element composition of the cultivated flax and some of its wild relatives. *Food Science and Technology*. 2021. Vol. 15, Issue 1. P. 73–79.

14. Shibli S., Siddique F., Raza S., Ahsan Z., Raza I. Chemical Composition and Sensory Analysis of Peanut Butter from Indigenous Peanut Cultivars of Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Research*. 2019. Vol. 32. P. 159–169. doi: 10.17582/journal.pjar/2019/32.1.159.169.
15. Vasudha C., Sarla L. Nutritional quality analysis of sunflower seed cake (SSC). *The Pharma Innovation Journal*. 2021. Vol. 10, №4. P. 720–728.
16. Çetin N., Karaman K., Beyzi E., Sağlam C., Demirel B. Comparative Evaluation of Some Quality Characteristics of Sunflower Oilseeds (*Helianthus annuus* L.) Through Machine Learning Classifiers. *Food Analytical Methods*. 2021. Vol. 14. P. 1666–1681. doi: 10.1007/s12161-021-02002-7.
17. Qamar H., Ilyas M., Shabbir G., Irshad G., Nisar F., Abbas S.M., Ghias M., Arshad A. Flax: Ancient to modern food. *Published by Bolan Society for Pure and Applied Biology. Pure Appl. Biol*. 2019. Vol. 8, №4. P. 2269–2276. doi: 10.19045/bspab.2019.80173.
18. Sharma L., Charaniv S. S., Punia S., Nai V., Kawaljit S. S. Sesame (*Sesamum indicum*) Seed. *Oilseeds: Health Attributes and Food Applications*. 2021. P. 305–330. doi: 10.1007/978-981-15-4194-0_12.
19. Zhang H., Langham D., Miao H. Economic and Academic Importance of Sesame. *The Sesame Genome. Compendium of Plant Genomes*. 2021. P. 1–18. doi: 10.1007/978-3-319-98098-0_1.
20. Alshehry G. A. Preparation And Nutritional Properties Of Cookies From The Partial Replacement Of Wheat Flour Using Pumpkin Seeds Powder. *World Journal of Environmental Biosciences*. 2020. Vol. 9, Issue 2. P. 48–56.
21. Amin M. Z., Islam T., Uddin M. R., Rahman M. M. Abdus Satterc. Comparative study on nutrient contents in the different parts of indigenous and hybrid varieties of pumpkin (*Cucurbita maxima* Linn.). *Heliyon*. 2019. Vol. 5, Issue 9. P. 1–5. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02462.
22. Архипова В. І., Язвінська Н. В. Сучасні тренди ринку натуральних солодоців. II Міжнародна науково-практична конференція «Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи». Секція 2. Менеджмент міжнародного бізнесу в умовах глобалізації, 22 квітня 2021 р., Київ. С. 146–147.
23. Irakli M., Tsaliki E., Kalivas A., Kleisiaris F., Sarrou E., Cook C.M. Effect of Genotype and Growing Year on the Nutritional, Phytochemical, and Antioxidant Properties of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Seeds. *Antioxidants*. 2019. Vol. 8, № 10. P. 491. doi: 10.3390/antiox8100491.
24. Хліб «Вівсяна родзинка»: пат. 116667 Україна: МПК (2017.01) A21D 13/00, A21D 2/36 (2006.01). № у 2016 13459; заявл. 27.12.2016; опубл. 25.05.2017, Бюл. №10.
25. Кручаниця М. І. та ін. *Основи харчування: підручник*. Ужгород, 2019. 252 с.
4. Sposib vyrobnytstva tsukerok typu miakoho hryliazhu na osnovi produktiv pererobky harbuza: pat. 149722 Ukraina: MPK (2021.01) A23G 3/00. u 2021 03768; zaiavl. 01.07.2021; opubl. 01.12.2021, Biul. 48.
5. Tsukerky ozdorovchoho spriamuvannia «Nastochka»: pat. 139876 Ukraina: MPK (2020/1) A23G 3/00. u 2019 07311; zaiavl. 01.07.2019; opubl. 27.01.2020, Biul. 2.
6. Pomadno-kremovi tsukerky «Aroniia»: pat. 131288 Ukraina: MPK A23G 3/00. u 2018 07498; zaiavl. 04.07.2018; opubl. 10.01.2019, Biul. 1.
7. Romanova S. V., Demeshko O. V., Mykhailenko O. O., Volochai V. I., Kozyra S. A., Duchenko M. A. Biolohichno aktyvni rehovynny arakhisu kulturnoho. *Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «PLANTA+. NAUKA, PRAKTYKA TA OSVITA»*. 19 liutoho 2021, Kyiv, pp. 165–169.
8. Semko T. V., Ivanishcheva O. A. Kharchova alerhiia. *Novatsii v tekhnologii ta obladnanni hotelno-restorannykh, kharchovykh i pererobnykh vyrobnytstv: mizhnarodna naukovopraktychna internetkonferentsiia*, 24 lystopada 2020, Melitopol. TDATU, 2020, pp. 217–219.
9. Bonku R., Yu J. Health aspects of peanuts as an outcome of its chemical composition. *Food Science and Human Wellness*, 2020, vol. 9, Issue 1, pp. 21–30, doi: 10.1016/j.fshw.2019.12.005.
10. Oliveira Filho J. G. de, Egea M. B. Sunflower seed byproduct and its fractions for food application: An attempt to improve the sustainability of the oil process. Concise reviews & hypotheses in food science. *Journal of Food Science*, 2021, vol. 86, Issue 5, pp. 1497–1510, doi: 10.1111/1750-3841.15719.
11. Crescente G., Piccolella S., Esposito A., Scognamiglio M., Fiorentino A., Pacifico S. Chemical composition and nutraceutical properties of hempseed: an ancient food with actual functional value. *Phytochemistry Reviews*, 2018, vol. 17, Issue 4, pp. 733–749, doi: 10.1007/s11101-018-9556-2.
12. Xu J., Bai M., Song H., Yang L., Zhu D., Liu H. Hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) Chemical Composition and the Application of Hempseeds in Food Formulations. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2022, vol. 77, pp. 504–513, doi: 10.1007/s11130-022-01013-x.
13. Poliakova I., Sinyayeva N., Lyakh V. Specific features of the trace element composition of the cultivated flax and some of its wild relatives. *Food Science and Technology*, 2021, vol. 15, Issue 1, pp. 73–79.
14. Shibli S., Siddique F., Raza S., Ahsan Z., Raza I. Chemical Composition and Sensory Analysis of Peanut Butter from Indigenous Peanut Cultivars of Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 2019, vol. 32, pp. 159–169. doi: 10.17582/journal.pjar/2019/32.1.159.169.
15. Vasudha C., Sarla L. Nutritional quality analysis of sunflower seed cake (SSC). *The Pharma Innovation Journal*, 2021, vol. 10, 4, pp. 720–728.
16. Çetin N., Karaman K., Beyzi E., Sağlam C., Demirel B. Comparative Evaluation of Some Quality Characteristics of Sunflower Oilseeds (*Helianthus annuus* L.) Through Machine Learning Classifiers. *Food Analytical Methods*. 2021, vol. 14, pp. 1666–1681, doi: 10.1007/s12161-021-02002-7.
17. Qamar H., Ilyas M., Shabbir G., Irshad G., Nisar F., Abbas S.M., Ghias M., Arshad A. Flax: Ancient to modern food. *Published by Bolan Society for Pure and Applied Biology. Pure Appl. Biol.*, 2019, vol. 8, 4, pp. 2269–2276, doi: 10.19045/bspab.2019.80173.
18. Sharma L., Charaniv S. S., Punia S., Nai V., Kawaljit S. S. Sesame (*Sesamum indicum*) Seed. *Oilseeds: Health*

References (transliterated)

1. Piven O. M. Optymizatsiia retsepturnoho skladu ta deiakykh spozhvyvchykh vlastyvostei hrechanykh tsukerok. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv, 2020, 6, pp. 71–76, doi: 10.20998/2220-4784.2020.06.11
2. Kucheruk Z. I., Shmatchenko N. V. *Tekhnolohiia kondyterskykh vyrobiv: navch. posib*. Kharkiv. KhDUKhT, 2020. 179 p.
3. Stephen St. *Beckett Science of Chocolate*. UK. York, 2019. 205 p.
4. Sposib vyrobnytstva tsukerok typu miakoho hryliazhu na osnovi produktiv pererobky harbuza: pat. 149722 Ukraina: MPK (2021.01) A23G 3/00. u 2021 03768; zaiavl. 01.07.2021; opubl. 01.12.2021, Biul. 48.
5. Tsukerky ozdorovchoho spriamuvannia «Nastochka»: pat. 139876 Ukraina: MPK (2020/1) A23G 3/00. u 2019 07311; zaiavl. 01.07.2019; opubl. 27.01.2020, Biul. 2.
6. Pomadno-kremovi tsukerky «Aroniia»: pat. 131288 Ukraina: MPK A23G 3/00. u 2018 07498; zaiavl. 04.07.2018; opubl. 10.01.2019, Biul. 1.
7. Romanova S. V., Demeshko O. V., Mykhailenko O. O., Volochai V. I., Kozyra S. A., Duchenko M. A. Biolohichno aktyvni rehovynny arakhisu kulturnoho. *Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «PLANTA+. NAUKA, PRAKTYKA TA OSVITA»*. 19 liutoho 2021, Kyiv, pp. 165–169.
8. Semko T. V., Ivanishcheva O. A. Kharchova alerhiia. *Novatsii v tekhnologii ta obladnanni hotelno-restorannykh, kharchovykh i pererobnykh vyrobnytstv: mizhnarodna naukovopraktychna internetkonferentsiia*, 24 lystopada 2020, Melitopol. TDATU, 2020, pp. 217–219.
9. Bonku R., Yu J. Health aspects of peanuts as an outcome of its chemical composition. *Food Science and Human Wellness*, 2020, vol. 9, Issue 1, pp. 21–30, doi: 10.1016/j.fshw.2019.12.005.
10. Oliveira Filho J. G. de, Egea M. B. Sunflower seed byproduct and its fractions for food application: An attempt to improve the sustainability of the oil process. Concise reviews & hypotheses in food science. *Journal of Food Science*, 2021, vol. 86, Issue 5, pp. 1497–1510, doi: 10.1111/1750-3841.15719.
11. Crescente G., Piccolella S., Esposito A., Scognamiglio M., Fiorentino A., Pacifico S. Chemical composition and nutraceutical properties of hempseed: an ancient food with actual functional value. *Phytochemistry Reviews*, 2018, vol. 17, Issue 4, pp. 733–749, doi: 10.1007/s11101-018-9556-2.
12. Xu J., Bai M., Song H., Yang L., Zhu D., Liu H. Hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) Chemical Composition and the Application of Hempseeds in Food Formulations. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2022, vol. 77, pp. 504–513, doi: 10.1007/s11130-022-01013-x.
13. Poliakova I., Sinyayeva N., Lyakh V. Specific features of the trace element composition of the cultivated flax and some of its wild relatives. *Food Science and Technology*, 2021, vol. 15, Issue 1, pp. 73–79.
14. Shibli S., Siddique F., Raza S., Ahsan Z., Raza I. Chemical Composition and Sensory Analysis of Peanut Butter from Indigenous Peanut Cultivars of Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 2019, vol. 32, pp. 159–169. doi: 10.17582/journal.pjar/2019/32.1.159.169.
15. Vasudha C., Sarla L. Nutritional quality analysis of sunflower seed cake (SSC). *The Pharma Innovation Journal*, 2021, vol. 10, 4, pp. 720–728.
16. Çetin N., Karaman K., Beyzi E., Sağlam C., Demirel B. Comparative Evaluation of Some Quality Characteristics of Sunflower Oilseeds (*Helianthus annuus* L.) Through Machine Learning Classifiers. *Food Analytical Methods*. 2021, vol. 14, pp. 1666–1681, doi: 10.1007/s12161-021-02002-7.
17. Qamar H., Ilyas M., Shabbir G., Irshad G., Nisar F., Abbas S.M., Ghias M., Arshad A. Flax: Ancient to modern food. *Published by Bolan Society for Pure and Applied Biology. Pure Appl. Biol.*, 2019, vol. 8, 4, pp. 2269–2276, doi: 10.19045/bspab.2019.80173.
18. Sharma L., Charaniv S. S., Punia S., Nai V., Kawaljit S. S. Sesame (*Sesamum indicum*) Seed. *Oilseeds: Health*

- Attributes and Food Applications*, 2021, pp. 305–330, doi: 10.1007/978-981-15-4194-0_12.
19. Zhang H., Langham D., Miao H. Economic and Academic Importance of Sesame. *The Sesame Genome. Compendium of Plant Genomes*, 2021, pp. 1–18, doi: 10.1007/978-3-319-98098-0_1.
20. Alshehry G. A. Preparation And Nutritional Properties Of Cookies From The Partial Replacement Of Wheat Flour Using Pumpkin Seeds Powder. *World Journal of Environmental Biosciences*, 2020, vol. 9, Issue 2, pp. 48–56.
21. Amin M. Z., Islam T., Uddin M. R., Rahman M. M. Abdus Satterc. Comparative study on nutrient contents in the different parts of indigenous and hybrid varieties of pumpkin (*Cucurbita maxima* Linn.). *Heliyon*, 2019, vol. 5, Issue 9, pp. 1–5, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02462.
22. Arkhypova V. I., Yazvinska N. V. Suchasni trendy rynku naturalnykh solodoshchiv. *II Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Biznes, innovatsii, menedzhment: problemy ta perspektyvy»*. Sektsiia 2. *Menedzhment mizhnarodnoho biznesu v umovakh hlobalizatsii*, 22 kvitnia 2021, Kyiv, pp. 146–147.
23. Irakli M., Tsaliki E., Kalivas A., Kleisiaris F., Sarrou E., Cook C.M. Effect of Genotype and Growing Year on the Nutritional, Phytochemical, and Antioxidant Properties of Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.) Seed. *Antioxidants*, 2019, vol. 8, 10, pp. 491, doi: 10.3390/antiox8100491.
24. Khlіb «Vivsiana rodzynka»: pat. 116667 Ukraina: MPK (2017.01) A21D 13/00, A21D 2/36 (2006.01). u 2016 13459; zaiavl. 27.12.2016; opubl. 25.05.2017, Biul. 10.
25. Kruchanytsia M. I. ta in. *Osnovy kharchuvannia: pidruchnyk*. Uzhhorod, 2019. 252 p.

Відомості про авторів (About the authors)

Сова Наталія Анатоліївна – кандидатка технічних наук, доцентка, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, доцентка кафедри харчових технологій; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4750-2473>; e-mail: sova.n.a@dsau.dp.ua.

Sova Nataliia – Candidate of Technical Science (Ph. D.), Associate Professor, Dnipro State Agrarian and Economic University, Associate Professor of Department of Food Technologies; Dnipro, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4750-2473>; e-mail: sova.n.a@dsau.dp.ua.

Коваленко Наталія Валеріївна – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, асистентка кафедри харчових технологій; м. Дніпро, Україна; e-mail: natalikovalenko262@gmail.com.

Kovalenko Nataliia – Dnipro State Agrarian and Economic University, Assistant of Department of Food Technologies; Dnipro, Ukraine; e-mail: natalikovalenko262@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сова Н. А., Коваленко Н. В. Розробка рецептури грильяжних цукерок на основі насіння олійних культур. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 70-77. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.10.

Please cite this article as:

Sova N., Kovalenko N. Development of a recipe for grillage candy based on oil seeds. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 70-77, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.10.

*Надійшла (received) 29.01.2024
Прийнята (accepted) 20.03.2024*

УДК 621.314.5

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.11

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В 24-ПУЛЬСНОМУ ВИПРЯМЛЯЧІ З ЕЛЕКТРОННИМ ЗСУВОМ ФАЗ НА IGBT-ТРАНЗИСТОРАХ З ЗВОРотною БЛОКУЮЧОЮ ВЛАСТИВІСТЮ

Ю. С. ВОЙТОВИЧ^{*1}, Б. О. СТИСЛО¹, О. В. ЧМИХОВА¹, О. А. ПЛАХТІЙ²

¹ кафедра «Промислова і біомедична електроніка», НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² кафедра «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», УКРДУЗТ, Харків, УКРАЇНА

* e-mail: Yuri.Voitovych@khp.edu.ua.

АНОТАЦІЯ При використанні в багатопульсних випрямлячах з електронним зсувом фаз одноопераційних напівпровідникових ключів та повністю керованих напівпровідникових ключів зі зворотною блокуючою здатністю - виникає проблема, яка зумовлена різним часом комутації цих типів ключів. Її вирішення можливе при використанні повністю керованих ключів для всіх 6-пульсних випрямлячів. Тим самим можна здійснити уніфікацію модулів перетворювача. Недоліком такого рішення є деяке збільшення вартості напівпровідникових елементів. Схема уніфікованих модулів може бути виконана на будь-яких повністю керованих ключах зі зворотною блокуючою здатністю. Наприклад, симетричних GTO, або IGBT з послідовним діодом. При використанні повністю керованих вентилів в випрямлячах з електронним зсувом фаз, перемикання вентилів відбувається практично миттєво. Оскільки накопичена енергія в кабелях мережі змінитися миттєво не може, це призводить до виходу ключів з ладу. Для захисту ключів, необхідно штучно створити додатковий контур комутації у вхідному ланцюзі випрямляча в момент часу переходу струму з однією фази на іншу. Метою цієї статті є дослідження комутаційних процесів в 24-пульсному випрямлячі з електронним зсувом фаз на IGBT-транзисторах з зворотною блокуючою здатністю і використанням ШІМ для балансування середнього значення випрямленої напруги уніфікованих випрямлячів.

Ключові слова: випрямляч; коефіцієнт потужності; електронний фазовий зсув; широтно-імпульсна модуляція; магнітні елементи; снабер; комутація.

RESEARCH OF COMMUTATION PROCESSES IN A 24-PULSE RECTIFIER WITH ELECTRONIC PHASE SHIFT ON IGBT TRANSISTORS WITH REVERSE BLOCKING CAPABILITY

Yu. VOITOVYCH^{*}, B. STYSLO¹, O. CHMYKHOVA¹, O. PLAKHTIY²

¹ Department "Industrial and Biomedical Electronics", NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

² Department "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics", UkrSURT", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT When used in multi-pulse rectifiers with electronic phase shift, namely the use of single-operation semiconductor switches that can operate with lagging control angles and fully controlled semiconductor switches with reverse blocking capability that operate with leading control angles, the following feature occurs, namely that the switching time of single-operation keys and fully managed keys is different. The solution to this problem is possible when using fully controlled switches for all 6-pulse rectifiers, thereby unifying the converter modules. The disadvantage of such a solution is some increase in the cost of semiconductor elements. The scheme of unified modules can be performed on any fully controlled switches with reverse blocking capability, for example, symmetrical GTOs, or IGBTs with a series diode. When using fully controlled valves in rectifiers with an electronic phase shift, the switching of the valves occurs almost instantly, since the accumulated energy in the network cables cannot change instantly, this leads to the failure of the switches. To protect the keys, it is necessary to artificially create an additional switching circuit in the input circuit of the rectifier at the time of the current transition from one phase to another. The purpose of this article is to study the switching processes in a 24-pulse rectifier with an electronic phase shift on IGBT transistors with reverse blocking capability and the use of PWM to balance the average value of the rectified voltage of unified rectifiers operating with large and small control angles.

Keywords: rectifier; power factor; electronic phase shift; pulse width modulation; magnetic elements; snubber; switching.

Вступ

Сьогодні відомі рішення синтезу 12-пульсних випрямлячів без використання фазозсувних магнітних елементів. В даних системах фазовий зсув здійснюється за так званим принципом «електронного зсуву» [1-3].

Для компенсації зсуву фаз, які викликані роботою традиційного керованого випрямляча на одноопераційних тиристорах, другий випрямляч виконується на повністю керованих ключах із

зворотною блокуючою здатністю, який працює з «випереджуваними» кутами керування [4-8]. Однак, в такому випадку час комутації одноопераційних ключів і повністю керованих ключів різний.

Вирішення даної проблеми можливе при використанні повністю керованих ключів для всіх 6-пульсних випрямлячів. Тим самим можна здійснити уніфікацію модулів перетворювача. Недоліком такого рішення є деяке збільшення вартості на напівпровідникові елементи. Схема уніфікованих

модулів може бути виконана на будь-яких повністю керованих ключах зі зворотною блокуючою здатністю, наприклад, симетричних GTO, або IGBT з послідовним діодом [5].

При використанні повністю керованих вентилів в уніфікованих випрямлячах з електронним зсувом фаз, перемикання вентилів відбувається практично миттєво. Оскільки накопичена енергія в кабелях мережі змінитися миттєво не може, це призводить до виходу ключів з ладу. Для захисту ключів, необхідно штучно створити додатковий контур комутації у вхідному ланцюзі випрямляча в момент часу переходу струму з однієї фази на іншу.

Мета роботи

Мета цієї роботи полягає в дослідженні комутаційних процесів в 24-пульсному випрямлячі з електронним зсувом фаз на IGBT-транзисторах із зворотною блокуючою здатністю і використанням ШІМ для балансування середнього значення випрямленої напруги уніфікованих випрямлячів, які працюють з різними кутами керування.

Виклад основного матеріалу

При розгляді електромагнітних процесів в випрямлячі на IGBT-транзисторах (рис. 1) було встановлено, що вимикання одного ключа призводить до миттєвого припинення протікання струму в ньому, тобто класична комутація відсутня. При цьому

протікання струму в індуктивності розсіювання мережі негайно припинитися не може. Часом комутації в такому випадку слід вважати інтервал між переходом струму з фази, що виходить з роботи, в фазу, що вступає в роботу.

Для виведення енергії, що накопичується в індуктивності розсіювання мережі живлення, в якості снабера, використовуються діодний міст DM ($VD1$ - $VD6$) і конденсатор C (рис. 1). Енергія, що накопичена в індуктивності розсіювання, передається спочатку в конденсатор, заряджаючи його, а потім може бути повернута до мережі або розсіяна в активному опорі (R).

Розглянемо процес комутації в другому уніфікованому модулі, який працює з відстаючим кутом керування і ШІМ (рис. 1).

Комутаційні процеси в уніфікованому модулі, що працює з ШІМ потрібно розглядати в два етапи.

Перший етап – замикання стійки уніфікованого модуля. У цьому випадку уніфікований модуль повністю відключений від джерела живлення. Другий етап – підключення уніфікованого модуля до мережі живлення.

Розглянемо процес комутації в другому уніфікованому модулі в момент часу, коли ключ $VT7$ вимикається і входить в роботу ключ $VT11$. При цьому в першому випрямлячі проводять струм ключі $VT1$, $VT2$, в третьому $VT15$, $VT14$ та $VT21$, $VT20$ в четвертому.

Контур проходження комутаційного струму наведено на рис. 2.

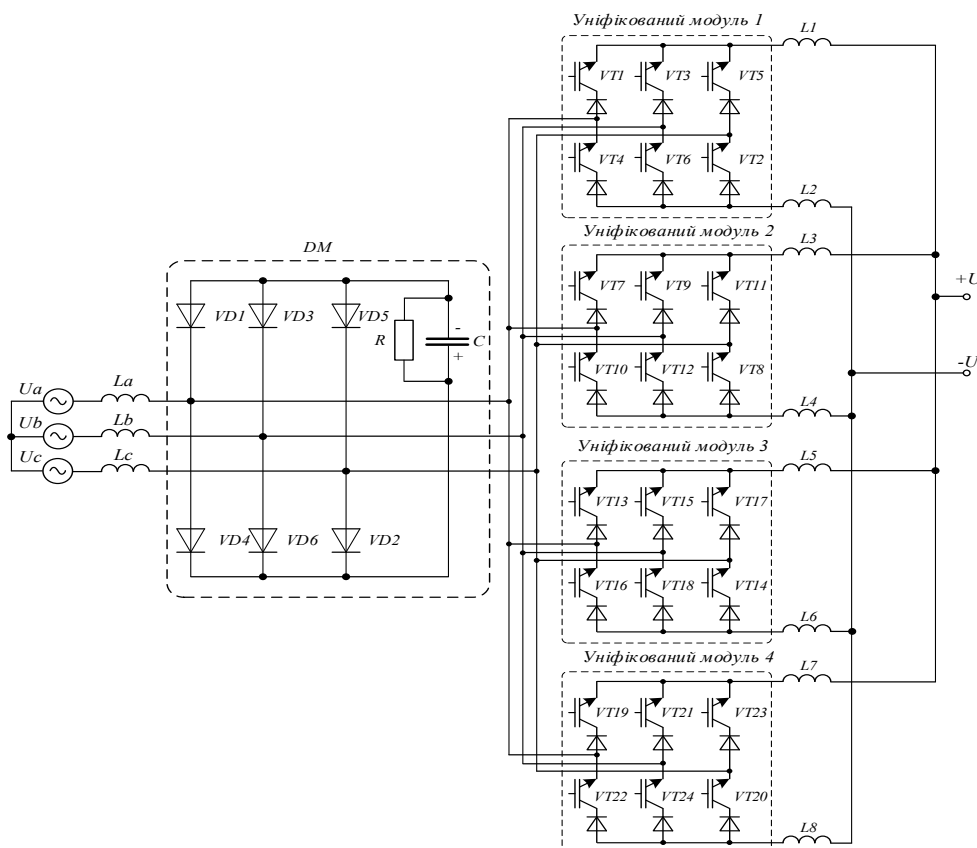


Рис. 1 – 24-пульсний випрямляч з електронним зсувом фаз і ШІМ

Накопичена енергія в індуктивності кабелю фази передається до снабера за наступним контуром $U_a \rightarrow VD4 \rightarrow C \rightarrow VD5 \rightarrow U_c$.

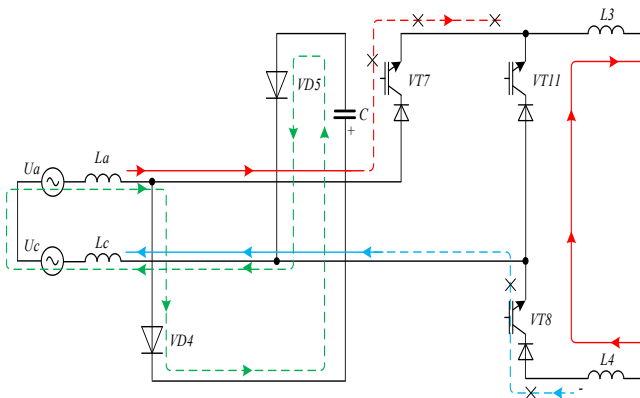


Рис. 2 – Контур проходження комутаційного струму в другому уніфікованому модулі

Як видно з рис. 2, фаза B не бере участі в комутації, індуктивності L_3 і L_4 також не впливають на процес комутації. На рис. 3 представлено контур комутації при виході з роботи ключа VT7.

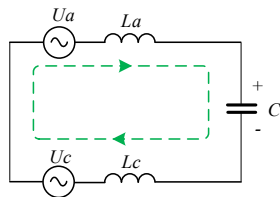


Рис. 3 – Контур комутації при виході з роботи ключа VT7

Величина комутаційного струму і час перехідного процесу в контурі визначається (рис. 3)

$$-U_a - U_c + U_c = L_a \cdot \frac{di_{La}}{dt} + L_c \cdot \frac{di_{Lc}}{dt} \quad (1)$$

Час перехідного процесу знаходимо з (1)

$$\Delta t = \frac{I_H \cdot L_a + I_H \cdot L_c}{4 \cdot (-U_a + U_c + U_c)} \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{I_H \cdot L_s}{2 \cdot (-U_a + U_c + U_c)} \quad (3)$$

де:

$$U_a = U_n \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (120 + (30 + \alpha + PWM))}{180}\right) \quad (4)$$

$$U_b = U_n \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (30 + \alpha + PWM)}{180}\right) \quad (5)$$

$$U_c = U_n \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (240 + (30 + \alpha + PWM))}{180}\right) \quad (6)$$

Для другого уніфікованого випрямляча кут керування $\alpha = 7,5 + \frac{\alpha_{PWM}}{2}$. Де U_c – напруга на конденсаторі снабера.

Розглянемо вплив комутаційного процесу на випрямлену напругу уніфікованих випрямлячів – $U_{d1}, U_{d2}, U_{d3}, U_{d4}$.

На рис. 4 представлено схему 24-пульсного випрямляча до моменту комутації в другому уніфікованому модулі.

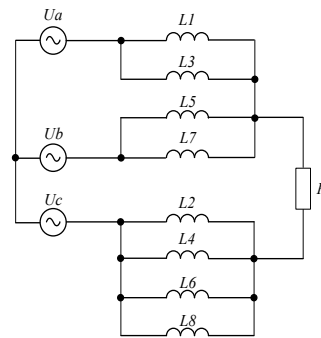


Рис. 4 – Еквівалентна схема 24-пульсного випрямляча до моменту комутації в другому уніфікованому модулі

До моменту комутації миттєве значення випрямленої напруги для першого і другого уніфікованих модулів (рис. 5) знаходимо за наступним виразом

$$U_{d1} = U_{d2} = U_a + U_c$$

Для третього і четвертого уніфікованих модулів миттєве значення випрямленої напруги (рис. 6) складає

$$U_{d3} = U_{d4} = U_b + U_c \quad (7)$$

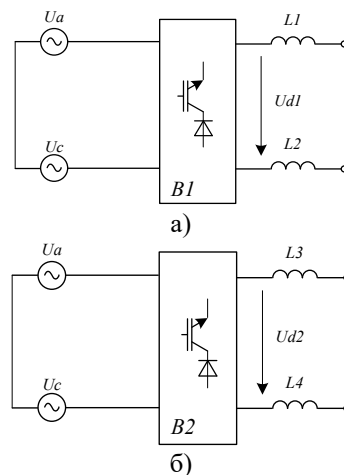


Рис. 5 – Перший уніфікований модуль (а), другий уніфікований модуль (б)

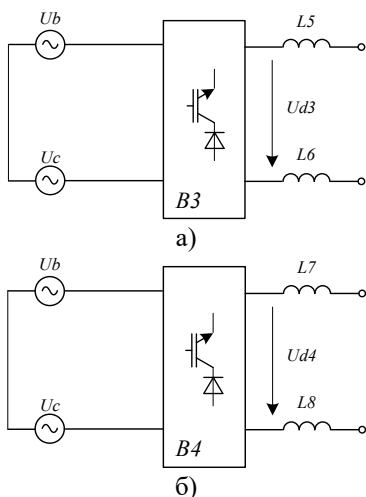


Рис. 6 – Третій уніфікований модуль (а), четвертий уніфікований модуль (б)

На рис. 7 представлено еквівалентну схему 24-пульсного випрямляча в момент комутації в другому уніфікованому модулі.

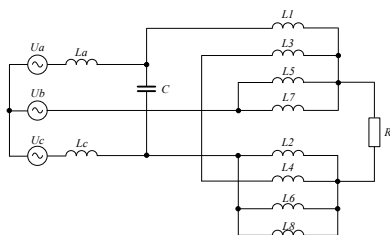


Рис. 7 – Еквівалентна схема 24-пульсного випрямляча в момент комутації

Значення випрямленої напруги для першого уніфікованого модуля $U_{d1} = U_c$ (рис. 8).

Значення випрямленої напруги для другого уніфікованого модуля $U_{d2} = 0$ (рис. 9).

Значення випрямленої напруги для третього і четвертого уніфікованих модулів (рис. 10)

$$U_{d3} = U_{d4} = U_b + L_c \cdot \frac{I_H}{\Delta t} - U_c \quad (8)$$

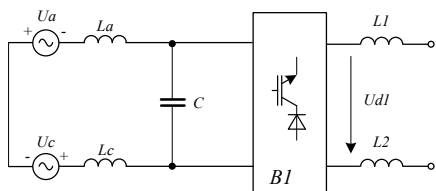


Рис. 8 – Перший уніфікований модуль

Розглянемо другий етап комутаційного процесу в другому уніфікованому модулі - підключення джерела живлення до даного модуля і включення ключа VT9.

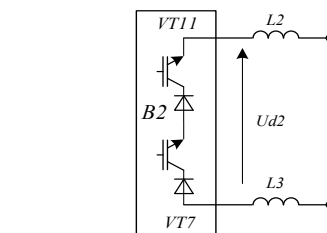


Рис. 9 – Другий уніфікований модуль

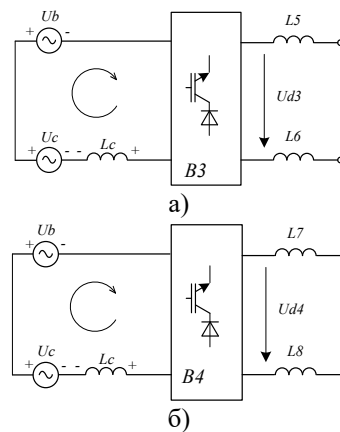


Рис. 10 – Третій уніфікований модуль (а), четвертий уніфікований модуль (б)

Контур проходження комутаційного струму наведено на рис. 11. Накопичена енергія в індуктивності кабелю фази передається в ємність снабера за наступним контуром $U_c \rightarrow VD2 \rightarrow C \rightarrow VD3 \rightarrow U_b$.

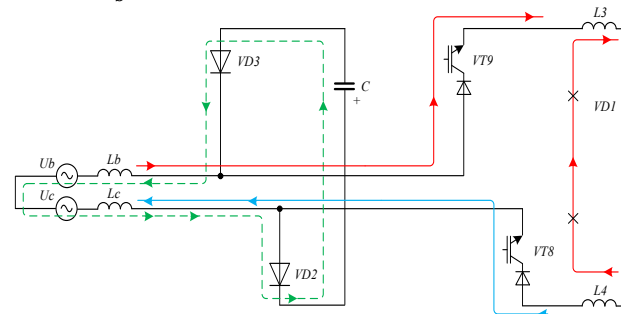


Рис. 11 – Контур проходження комутаційного струму в другому уніфікованому модулі

Як видно з рис. 11, фаза А не бере участі в комутації, індуктивності L_3 і L_4 також не впливають на її процес. На рис. 12 представлено контур комутації при включенні ключа VT9.

Для знаходження величини комутаційного струму і часу перехідного процесу, скористаємось другим законом Кірхгофа для контуру наведеного на рис. 11.

$$-U_b - U_c - U_c = L_b \cdot \frac{di_{Lb}}{dt} + L_c \cdot \frac{di_{Lc}}{dt} \quad (9)$$

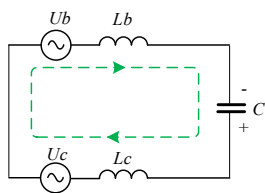


Рис. 12 – Контур проходження комутаційного струму

Час перехідного процесу знаходимо з формули (9)

$$\Delta t = \frac{I_H \cdot L_b + I_H \cdot L_c}{4 \cdot (U_C + U_b + U_c)} \quad (10)$$

$$\Delta t = \frac{I_H \cdot L_s}{2 \cdot (U_C + U_b + U_c)} \quad (11)$$

де:

$$U_a = U_L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (120 + (30 + \alpha + PWM))}{180}\right) \quad (12)$$

$$U_b = U_L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (30 + \alpha + PWM)}{180}\right) \quad (13)$$

$$U_c = U_L \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (240 + (30 + \alpha + PWM))}{180}\right) \quad (14)$$

Для другого випрямляча кут керування $\alpha = \left(7,5 - \frac{\alpha_{PWM}}{2}\right) + \alpha_{PWM}$. Де U_C – напруга на конденсаторі снаббера.

Розглянемо вплив комутаційного процесу на випрямлену напругу уніфікованих випрямлячів – U_{d1} , U_{d2} , U_{d3} , U_{d4} .

На рис. 13 наведено схему 24-пульсного випрямляча до моменту комутації в другому уніфікованому модулі (підключення модуля до мережі живлення).

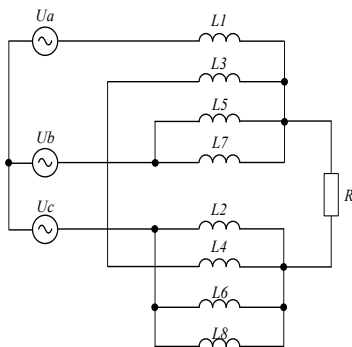


Рис. 13– Еквівалентна схема 24-пульсного випрямляча до моменту комутації

До моменту комутації миттєве значення випрямленої напруги для першого уніфікованого модуля (рис. 14) знаходимо за наступним виразом

$$U_{d1} = U_a + U_c \quad (15)$$

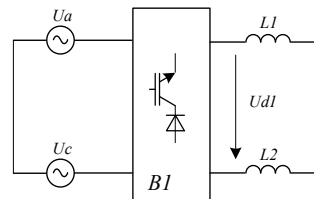


Рис. 14 – Перший уніфікований модуль

Для другого уніфікованого модуля миттєве значення випрямленої напруги $U_{d2} = 0$, (рис. 15).

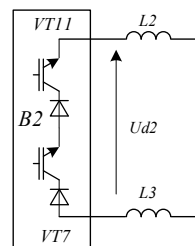


Рис. 15 – Другий уніфікований модуль

Для третього і четвертого уніфікованих модулів миттєве значення випрямленої напруги (рис. 16) становить

$$U_{d3} = U_{d4} = U_b + U_c \quad (16)$$

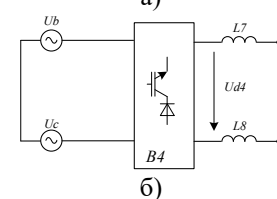
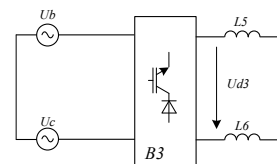


Рис. 16 – Третій уніфікований модуль (а), четвертий уніфікований модуль (б)

На рис. 17 наведено схему 24-пульсного випрямляча в момент комутації в другому уніфікованому модулі (підключення модуля до мережі живлення).

Значення випрямленої напруги для першого уніфікованого модуля (рис. 18), знаходимо за виразом:

$$U_{d1} = U_a - L_c \cdot \frac{I_H}{\Delta t} + U_c \quad (17)$$

Значення випрямленої напруги для другого, третього і четвертого уніфікованих модулів (рис. 19) знаходимо за виразом

$$U_{d2} = U_{d3} = U_{d4} = U_c \quad (18)$$

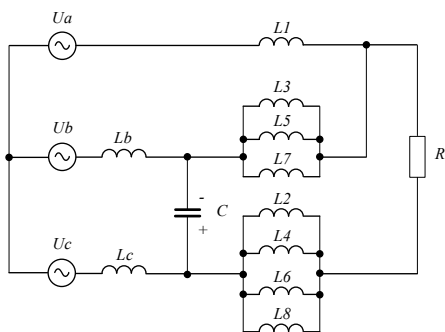


Рис. 17 – Еквівалентна схема 24-пульсного випрямляча в момент комутації

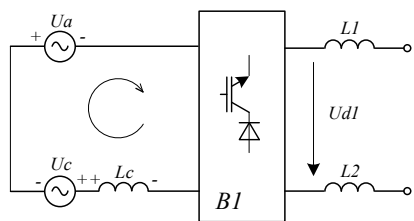
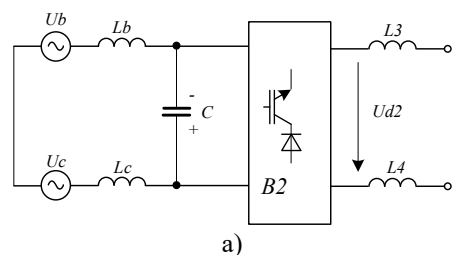
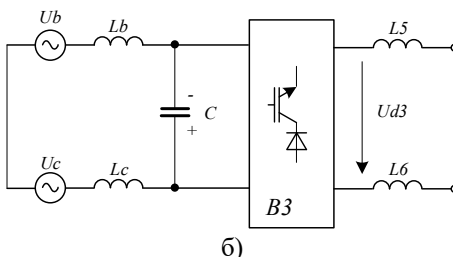


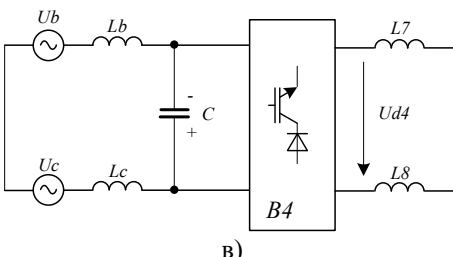
Рис. 18 – Перший уніфікований модуль



а)



б)



в)

Рис. 19 – Другий уніфікований модуль (а), третій уніфікований модуль (б), четвертий уніфікований модуль (в)

Таким самим чином були досліджені комутаційні процеси для третього і четвертого уніфікованих модулів.

В табл. 1 наведено всі можливі комбінації комутуючих фаз і відповідні їм включення діодів снабера.

Таблиця 1 – Комбінації комутуючих фаз і відповідні їм включення діодів снабера

Варіанти комутуючих фаз	Комутуючі діоди
U_a входить в роботу, U_b виходить з роботи	$VD6 - VD1$
U_a входить в роботу, U_c виходить з роботи	$VD2 - VD1$
U_b входить в роботу, U_a виходить з роботи	$VD4 - VD3$
U_b входить в роботу, U_c виходить з роботи	$VD2 - VD3$
U_c входить в роботу, U_a виходить з роботи	$VD4 - VD5$
U_c входить в роботу, U_b виходить з роботи	$VD6 - VD5$

Таким чином всі можливі комутації мають наступні контури проходження комутаційного струму: фаза що виходить з роботи – відповідний їй діод – конденсатор снабера – фаза яка входить в роботу (рис. 20, діоди не показано).

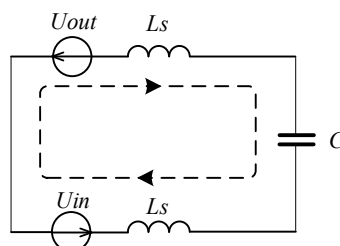


Рис. 20 – Комутаційний контур

В табл. 2 представлено залежності для визначення тривалості перехідного процесу і середніх значень випрямлених напруг уніфікованих модулів в моменти комутації ($K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$).

На рис. 21 наведено форми випрямлених напруг кожного із уніфікованих модулів які входять до складу 24-пульсного випрямляча визначених за формулами з табл. 2.

Час перехідного процесу Δt , пропорційний значенню індуктивності розсіювання L_s , струму навантаження I_d і залежить від напруги на конденсаторі снабера і напруги комутуючих фаз (кута керування α). Таким чином при незмінному значенні струму навантаження і індуктивності розсіювання фаз, можливий варіант регулювання часу перехідного процесу за допомогою снаберного конденсатора (шляхом збільшення або зменшення рівня напруги снаберного конденсатора).

Таблиця 2 - Залежності для визначення тривалості перехідного процесу і середніх значень випрямлених напруг уніфікованих модулів в моменти комутації

	κ_1	κ_2
Δt	$\Delta t_1 = \frac{I_H \cdot L_s}{2 \cdot (E_1 + U_a + U_b)}$	$\Delta t_2 = \frac{I_H \cdot L_s}{2 \cdot (-U_a + E_1 + U_b)}$
U_{d1}	$-U_c - U_b + L_b \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_1}$	$U_a + L_a \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_2} - U_c$
U_{d2}	$-U_c - U_b + L_b \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_1}$	$U_a + L_a \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_2} - U_c$
U_{d3}	$-U_c - U_b + L_b \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_1}$	$U_a + L_a \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_2} - U_c$
U_{d4}	$-U_c - U_b + L_b \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_1}$	$U_b + L_b \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_2} - U_c$
	κ_3	κ_4
Δt	$\Delta t_3 = \frac{I_H \cdot L_s}{2 \cdot (U_a - E_1 + U_c)}$	$\Delta t_4 = \frac{I_H \cdot L_s}{2 \cdot (E_1 + U_b + U_c)}$
U_{d1}	E_1	$-U_a + L_c \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_4} - U_c$
U_{d2}	E_1	$-U_a + L_c \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_4} - U_c$
U_{d3}	0	E_1
U_{d4}	$U_b - L_c \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_3} + U_c$	E_1
	κ_5	κ_6
Δt	$\Delta t_5 = \frac{I_H \cdot L_s}{2 \cdot (-U_a + E_1 + U_c)}$	$\Delta t_6 = \frac{I_H \cdot L_s}{2 \cdot (E_1 + E_b + E_c)}$
U_{d1}	E_1	$E_a - L_c \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_6} + E_c$
U_{d2}	0	E_1
U_{d3}	$U_b + L_c \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_5} - U_c$	E_1
U_{d4}	$U_b + L_c \cdot \frac{I_H}{4 \cdot \Delta t_5} - U_c$	E_1

Граничний рівень напруги на конденсаторі снабера визначається класом припустимої напруги напівпровідникових діодів снабера. Для того щоб визначити оптимальну величину напруги на конденсаторі снабера, було встановлено декілька режимів роботи схеми:

1. Перший режим – напруга на конденсаторі $U_c < E_{am}$; де E_{am} - амплітуда лінійної напруги джерела живлення, діодний міст DM працює в режимі випрямлення і конденсатор заряджається від джерела живлення до $U_c = E_{am}$.

2. Другий режим – рівень напруги $E_{am} < U_c < 2 \cdot L_s \frac{di}{dt}$; де $L_s \frac{di}{dt}$ – значення напруги на індуктивності розсіювання фази. На цьому інтервалі комутації через діоди моста DM протікає додатковий струм. На рис. 22 наведено комутаційний контур 24-пульсного випрямляча при рівні напруги на конденсаторі снабера $E_{am} < U_c < 2 \cdot L_s \frac{di}{dt}$.

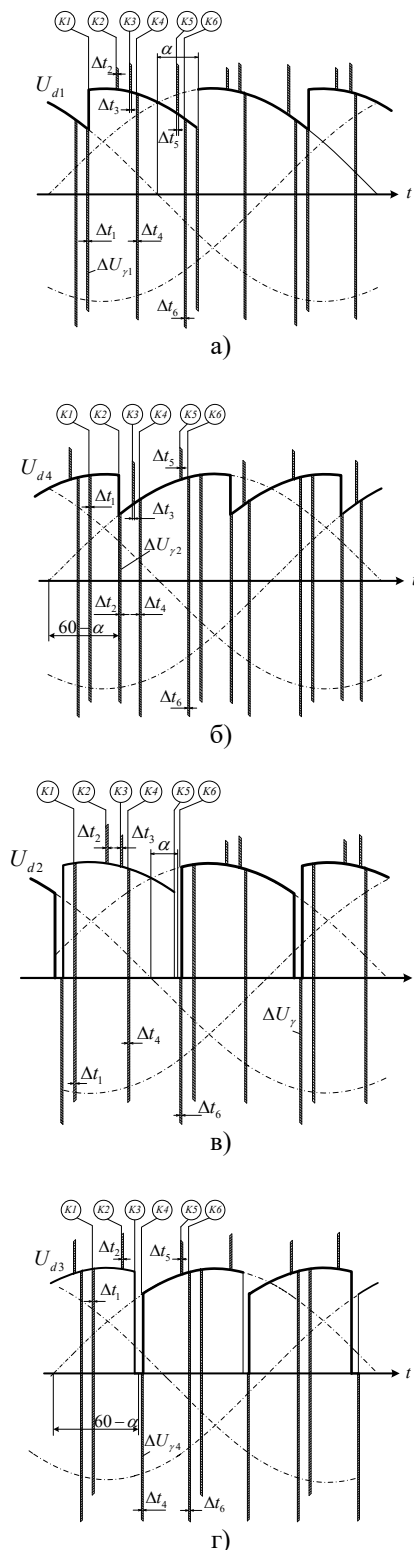


Рис. 21 – Форма випрямлених напруг 24-х пульсного випрямляча з електронним зсувом фаз і ШІМ. Криві випрямлених напруг першого уніфікованого модуля (а), криві випрямлених напруг другого уніфікованого модуля (б), криві випрямлених напруг третього уніфікованого модуля (в), криві випрямлених напруг четвертого уніфікованого модуля (г)

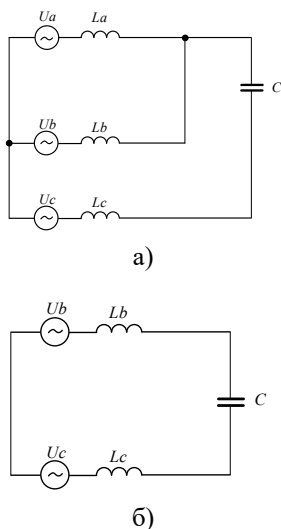


Рис. 22 – Комутаційний контур 24-х пульсного випрямляча протягом інтервалу часу проходження додаткового струму комутації (а), часу комутаційного процесу без проходження додаткового струму (б)

Як видно з (рис. 22, а) при рівні напруги $E_{am} < U_C < 2 \cdot L_s \frac{di}{dt}$ в комутаційному процесі беруть участь три фази. На рис. 23 наведено перехідні процеси в фазах А, В, С та в випрямлячі з використанням повністю керованих ключів з зворотною блокуючою здатністю.

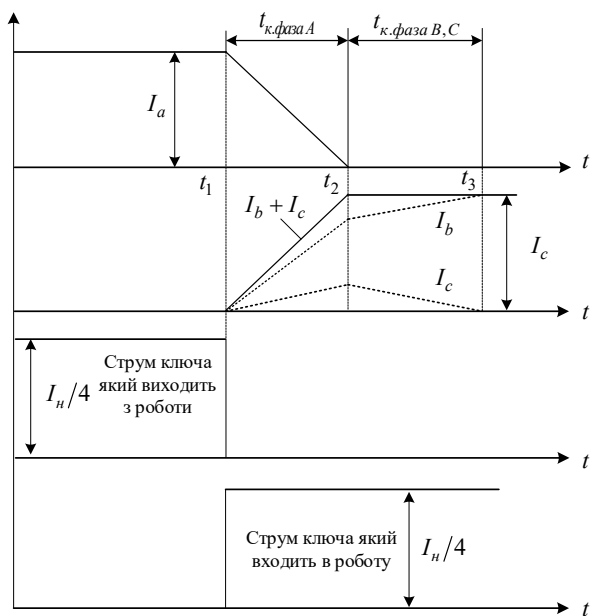


Рис. 23 – Перехідні процеси в фазах А, В, С та ключах випрямляча

Процес комутації при рівні напруги $E_{am} < U_C < 2 \cdot L_s \frac{di}{dt}$ можна розділити на дві складові.

– Інтервал часу $t_1 - t_2$ в якій беруть участь в комутації три фази (рис. 22, а; рис. 23).

– Інтервал часу $t_2 - t_3$ в якій беруть участь в комутації дві фази (рис. 22, б; рис. 23).

Комутація струму в ключах випрямляча як видно з (рис. 24), проходить практично миттєво.

3. Третій режим – значення напруги на конденсаторі снабера $U_C \geq 2 \cdot L_s \cdot \frac{di}{dt}$, додатковий струм який протікає через діоди снабера відсутній.

Розглянувши еквівалентну схему контуру комутації (рис. 20), з урахуванням зміни струмів у фазах (інтервал часу $\Delta t = t_2 - t_1$, рис. 24), отримано вирази для визначення часу комутації струму двох фаз Δt (табл. 3).



Рис. 24 – Перехідні процеси в ключах снабера та ключах випрямляча з використанням повністю керованих ключів з зворотною блокуючою здібністю

Комутація струму в транзисторах, як видно з (рис. 24), проходить майже миттєво, це пояснюється тим, що в будь який момент часу, струм фази який виходить з роботи компенсує струм фази яка тільки входить в роботу. Беручи до уваги цей факт, для системи керування необхідною умовою є забезпечення одночасного вмикання і вимикання транзисторів комутуючих фаз.

Робочими режимами можуть являтися як другий так і третій режими. Як було сказано вище, вибір напівпровідникових ключів снабера та випрямляча визначається з урахуванням граничного рівня напруги на конденсаторі снабера. Таким чином, другий режим є більш вигідним з точки зору вибору вентилів за класом напруги, але при цьому в даному режимі протікають додаткові струми комутації, що знижують коефіцієнт корисної дії.

Для того, щоб визначитися який режим є більш доцільним, необхідно проаналізувати потужність комутаційних втрат перетворювача.

Визначимо індуктивність мережі живлення. Знаючи відношення струму короткого замикання мережі живлення до струму навантаження (табл. 3) [9, 10, 11], можна визначити індуктивність розсіювання за наступними виразами

$$K_{\text{сети}} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (17)$$

де I_{SC} – струм короткого замикання мережі живлення; I_L – струм навантаження.

$$I_{SC} = \frac{U_{\text{сетиф.}}}{\omega \cdot L_{\phi}} \quad (19)$$

де $U_{\text{сетиф.}}$ – фазна напруга джерела живлення, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$.

Таблиця 3 – Максимальний вміст гармонік струму у відсотках в точці загального приєднання для розподільчих мереж загального користування

Максимальні значення вмісту гармонік споживаного струму з мережі						
Значення гармонік						
$\frac{I_{SC}}{I_L}$	3 $\leq h$	11 $\leq h$	17 $\leq h$	23 $\leq h$	35 $\leq h$	THD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1,0	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4,0	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5,0	2,0	1,0	15
> 1000	15	7	6,0	2,5	1,4	20

I_{SC} - струм короткого замикання мережі живлення
 I_L - струм навантаження

Струм фази знаходимо за виразом

$$I_{L\phi} = \frac{P_n}{3 \cdot U_{\text{мережіф.}}} \quad (20)$$

де P_n – потужність навантаження.
Тоді

$$\left(\frac{U_{\text{мережіф.}}}{\omega \cdot L_{\phi}}\right) = \frac{U_{\text{мережіф.}} \cdot U_{\text{мережіф.}}}{\omega \cdot L_{\phi} \cdot \frac{P_n}{3}} = \frac{3 \cdot U_{\text{мережіф.}}^2}{\omega \cdot L_{\phi} \cdot P_n} = K_{\text{мережі}} \quad (21)$$

З (20) індуктивність фази становить

$$L_{\phi} = \frac{3 \cdot U_{\text{мережіф.}}^2}{\omega \cdot P_n \cdot K_{\text{мережі}}} \quad (22)$$

На рис. 25 наведено залежності індуктивності розсіювання фази від потужності мережі живлення при різних значеннях потужності навантаження.

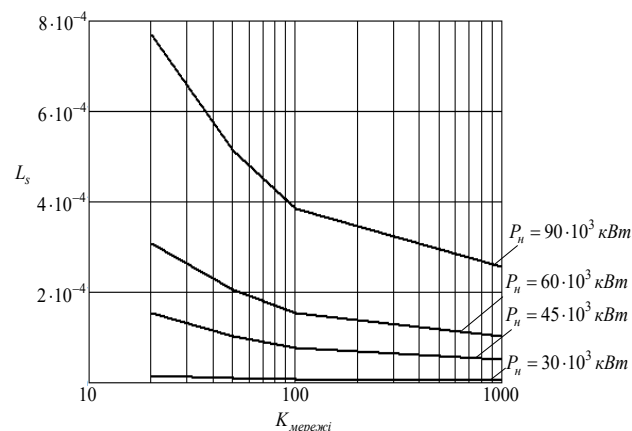


Рис. 25 – Залежність індуктивності розсіювання фази від потужності мережі живлення при різних значеннях потужності навантаження

Накопичена енергія в індуктивності мережі передається в снаберний конденсатор (рис. 26).

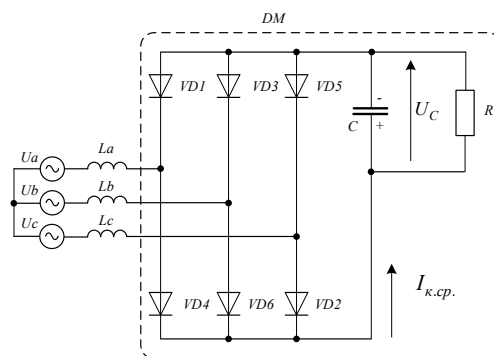


Рис. 26 – Схема снаберного пристрою

Для підтримання заданого рівня напруги на конденсаторі снабера в найпростішому випадку можна використати паралельний резистор.

Використовуючи знайдені вирази для визначення тривалості комутаційного процесу (табл. 2), амплітуду струму комутації і період повторення (рис. 27) можна знайти середнє значення струму комутації.

Середнє значення струму комутації 24-пульсного випрямляча можна визначити

$$I_{\text{к.сп.}} = \frac{\frac{1}{2}(\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6)}{T} \cdot \frac{P_n}{4 \cdot U_n} \quad (23)$$

Потужність комутаційних процесів можна визначити за виразом

$$P_{\text{ком.}} = I_{\text{к.сп.}} \cdot U_C = I_{\text{к.сп.}}^2 \cdot R = \frac{U_C^2}{R} \quad (24)$$

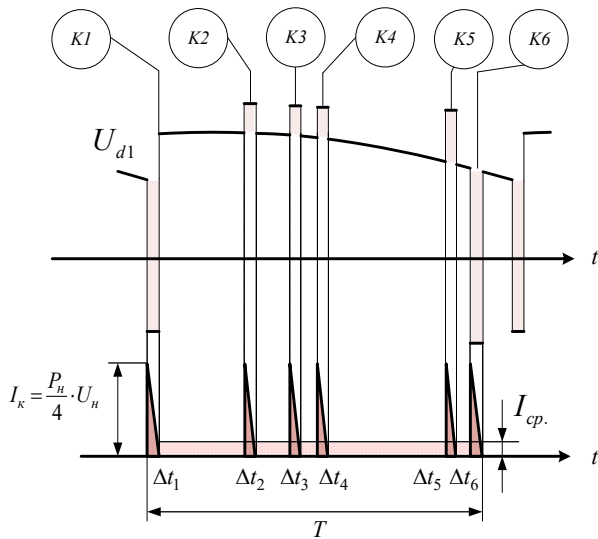


Рис. 27 – Діаграми випрямленої напруги уніфікованого модуля з ШІМ, та струм снабера під час комутації

На рис. 28 наведено залежність потужності комутації від індуктивності мережі живлення та різних значеннях напруги на конденсаторі снабера (для експерименту з напругою живлення 380 В і потужністю навантаження 90 кВт).

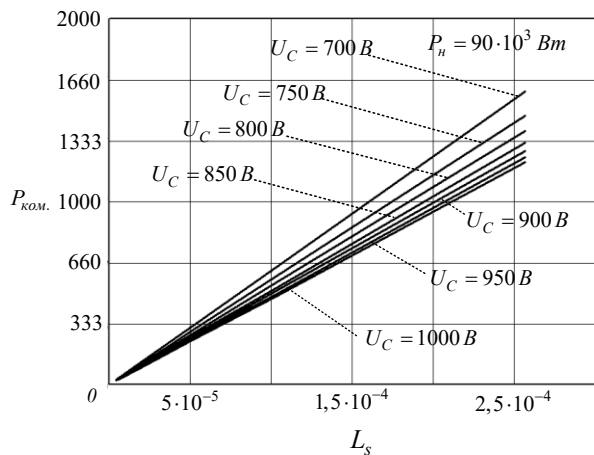


Рис. 28 – Залежність потужності комутації від індуктивності мережі живлення при потужності навантаження 90 кВт та різних значеннях напруги на конденсаторі снабера

На рис. 29 наведено залежності потужності комутації від потужності мережі живлення при потужності навантаження 90 кВт та різних значеннях напруги на конденсаторі снабера.

На рис. 30 наведено залежності потужності комутації від індуктивності мережі живлення при різних значеннях потужності навантаження за умови напруги на конденсаторі снабера 800 В.

При потужності мережі $\frac{I_{sc}}{I_L} = 20$ потужність комутації складає 1120 Вт, або 1 % від потужності

навантаження. При використанні більш потужних мереж, комутаційні втрати будуть зменшуватися.

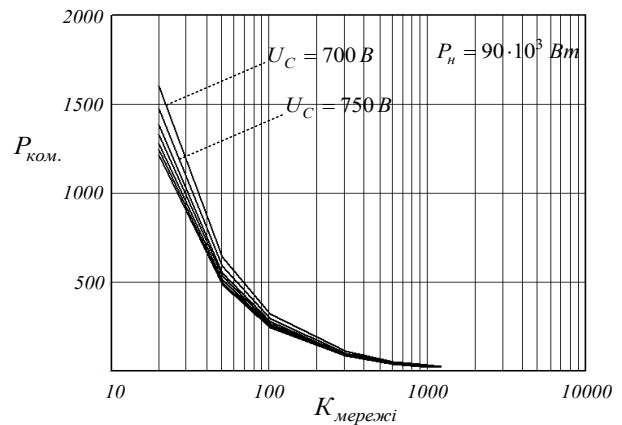


Рис. 29 – Залежність потужності комутації від індуктивності мережі живлення

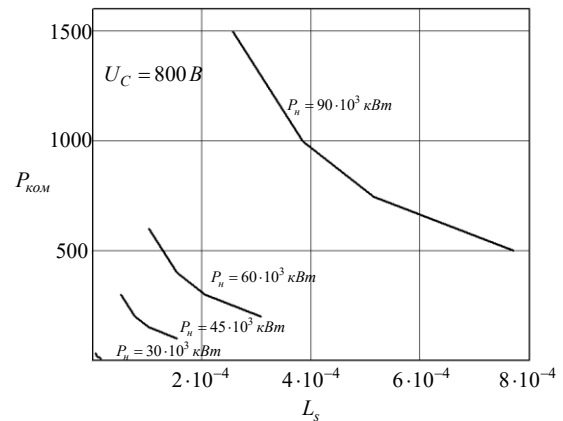


Рис. 30 – Залежності потужності комутації від індуктивності мережі живлення (380 В) при різних значеннях потужності навантаження, $U_C = 800 В$

Після аналізу комутаційних втрат можна зробити наступні висновки:

- передача накопиченої енергії під час комутації в мережу є недоцільною [13, 14];
- оскільки потужність комутаційних процесів мало впливає на ККД, в якості робочого режиму роботи снабера, можна використати другий режим, де рівень напруги на конденсаторі можна прийняти $E_{ам} \cdot 1,15$.

Здійснено дослідження електромагнітних процесів та енергетичних показників 24-пульсного паралельного випрямляча, який працює від мережі 380 В, на активно-емнісне навантаження потужністю 90 кВт [15]. Дослідження проводилися в комп'ютерній програмі Matlab/Simulink.

Комутація струму в IGBT-транзисторах, як видно з рис. 31, проходить миттєво, це пояснюється тим, що в будь який момент часу струм фази, який виходить з роботи компенсує струм фази, яка тільки входить в роботу.

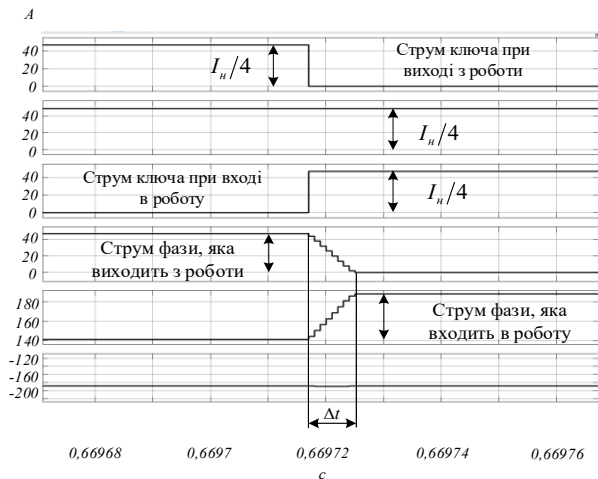


Рис. 31 – Комутація струму в ключах випрямляча

На рис. 32, наведено машинограми випрямленої напруги уніфікованого модуля і струм комутації. Середнє значення струму комутації, як видно з рис. 32, а, дорівнює $I_{\text{ком.ср.}} = 1,18\text{А}$ при $L_S = 250\text{мГн}$, $P_H = 90\text{кВт}$, $U_C = 850\text{В}$. Потужність комутаційних процесів (енергія розсіювання в активному опорі снабера) складає

$$P_{\text{ком.}} = I_{\text{ком.ср.}} \cdot U_C = 1,18 \cdot 850 = 1120\text{Вт}$$

Як видно з рис. 32, теоретичні результати для визначення потужності комутаційних процесів отримані аналітично співпадають з експериментальними.

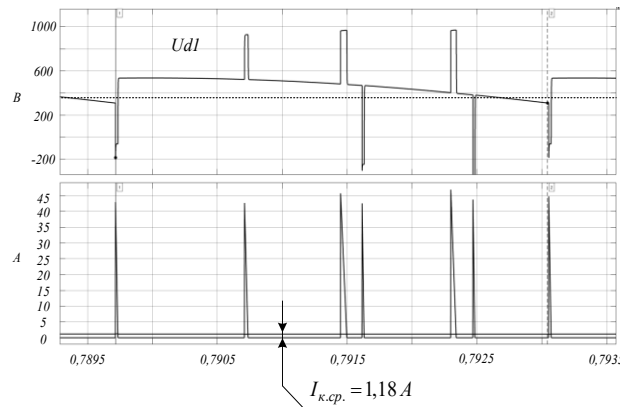


Рис. 32 – Машинограми випрямленої напруги уніфікованого модуля і струм комутації

На рис. 33 наведені осцилограми випрямлених напруг чотирьох уніфікованих модулів (U_{d1} , U_{d2} , U_{d3} , U_{d4}), фазні струми мережі (I_a , I_b , I_c) та фазні напруги джерела живлення (U_a , U_b , U_c) 24-пульсного випрямляча з електронним зсувом фаз та ШІМ.

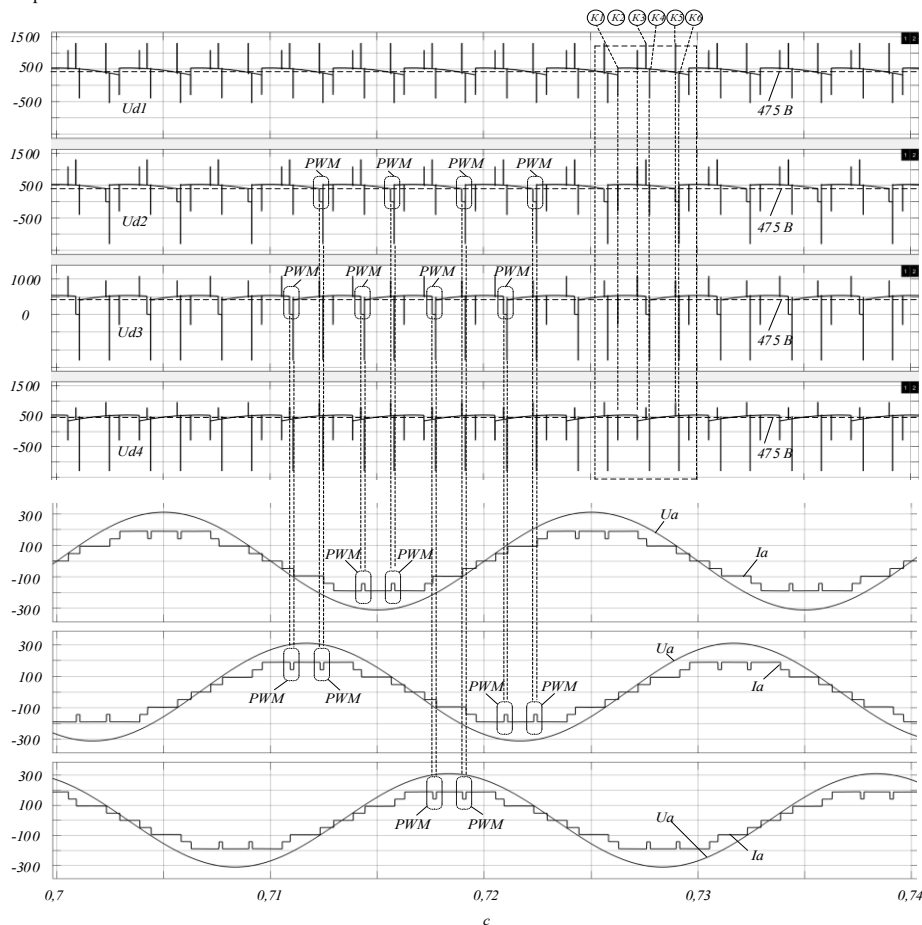


Рис. 33 – Осцилограми випрямленої напруги чотирьох уніфікованих модулів, фазні струми мережі та фазні напруги джерела живлення

Висновки

В роботі досліджено електромагнітні процеси в трифазному багатопульсовому випрямлячі з електронним зсувом фаз при використанні повністю керованих напівпровідникових ключів із зворотною блокуючою здатністю, що дало можливість отримати основні вирази для оцінки комутаційних втрат.

При дослідженні комутаційних процесів 24-пульсного випрямляча з використанням ШІМ було підтверджено працездатність розробленого комутаційного контуру.

Експериментальні дослідження показали, що при використанні відстаючого та випереджаючого кута керування при здійсненні електронного зсуву фаз в багатопульсних трифазних випрямлячах, забезпечується одиничний коефіцієнт зсуву споживного струму з мережі відносно напруги живлення перетворювача.

При потужності мережі $\frac{I_{sc}}{I_L} = 20$ потужність комутації складає 1120 Вт, або 1 % від потужності навантаження. При використанні більш потужних мереж, комутаційні втрати будуть зменшуватися.

Після аналізу комутаційних втрат можна зробити наступні висновки:

– передача накопленої енергії під час комутації в мережу є недоцільною;

– оскільки потужність комутаційних процесів мало впливає на ККД, в якості робочого режиму роботи снабера, можна використати другий режим, де рівень напруги на конденсаторі можна прийняти $E_{am} \cdot 1,15$.

Список літератури

1. Sokol Y. I., Zamaruiev V. V., Ivakhno V. V., Voitovych Yu. S. Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier. *Electrical, Control and Communication Engineering. The Journal of Riga Technical University*. 2017. Vol.12. P. 5-10.
2. Sokol E., Zamaruiev V., Ivakhno V., Voitovych Y. Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier. *16th International Symposium Pärnu 2017 "Topical Problems In The Field Of Electrical And Power Engineering" And "Doctoral School Of Energy And Geotechnology Iii" Pärnu*, 2017. Estonia (January 16 - 21, 2017). P. 160-162.
3. Blauth Y. B. and Barbi I. A phase-controlled 12-pulse rectifier with unity displacement factor without phase shifting transformer. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 1998. Vol. 98. P. 970-976.
4. Sokol Y. I., Zamaruiev V. V., Ivakhno V. V., Voitovych Y. S. Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier. *Electrical, Control and Communication*. 2017. Vol. 12. P. 5 - 10.
5. Choi S., Enjeti P. N., Pitel I. J. Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 1995. Vol. 11. P. 353 - 359.
6. IEEE Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformers. In IEEE Std C57.135-2011 (Revision of IEEE Std C57.135-2001). 2011. Vol. 135. P. 1-50.
7. Skibinski G. L., Guskov N. and Zhou Dong. Cost effective multi-pulse transformer solutions for harmonic mitigation in

- AC drives. *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference*. 2003. P. 1488-1497.
8. IEC 61000-3-12, Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤75 A per phase. 2011. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4144>. Access 1 June 2020
 9. Rahmani A., Deihimi A. Reduction of harmonic monitors and estimation of voltage harmonics in distribution networks using wavelet analysis and NARX. *Electr. Power Syst. Res.* 2020. Vol. 178. P. 106046.
 10. Kashif M., et al. A fast time-domain current harmonic extraction algorithm for power quality improvement using three-phase active power filter. *Electr. Power Syst. Res.* 2020. Vol. 12. P. 103539-103549.
 11. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Kotlyarov V. Analysis of topologies of active four-quadrant rectifiers for implementing the industry 4.0 principles in traffic power supply systems. *International scientific journal «INDUSTRY 4.0»*. 2019. Vol. 4. P. 57-61.
 12. Constantinescu M. D., Popescu M., Subtirelu G.-E. and Toma I.-C. Application of the Direct Power Control in a Three-Phase Shunt Active Power Filter System. *International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. 2023. Craiova, Romania. Vol. 38. P. 1-6.
 13. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 57. P. 302-318.
 14. Xu Y., Wang Z., Shen Y., Zou Z. and Deng F. An Improved Modulation Scheme of Isolated Matrix Converter for Common-Mode Voltage Reduction and DC-Bias Current Mitigation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023. Vol. 70. P. 1-10.
 15. Pandey D. C., Behera P. K. and Pattnaik M. Steady-State Analysis of Dual Active Bridge Converter with Single Phase Shift and Dual Phase Shift Modulation. *IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. 2023. Bhopal, India. P. 1-6.

References (transliterated)

1. Sokol Y. I., Zamaruiev V. V., Ivakhno V. V., Voitovych Yu. S. Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier. *Electrical, Control and Communication Engineering. The Journal of Riga Technical University*, 2017, vol. 12, pp. 5-10.
2. Sokol E., Zamaruiev V., Ivakhno V., Voitovych Y. Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier. *16th International Symposium Pärnu 2017 "Topical Problems In The Field Of Electrical And Power Engineering" And "Doctoral School Of Energy And Geotechnology Iii" Pärnu*, 2017, Estonia (January 16 - 21, 2017), pp. 160-162.
3. Blauth Y. B. and Barbi I. A phase-controlled 12-pulse rectifier with unity displacement factor without phase shifting transformer. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1998. vol. 98, pp. 970-976.
4. Sokol Y. I., Zamaruiev V. V., Ivakhno V. V., Voitovych Y. S. Electronic Phase Shifting in Multipulse Rectifier. *Electrical, Control and Communication*, 2017, vol. 12, pp. 5-10.
5. Choi S., Enjeti P. N., Pitel I. J. Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1995, vol. 11, pp. 353-359.

6. IEEE Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformers. In IEEE Std C57.135-2011 (Revision of IEEE Std C57.135-2001), 2011, vol. 135, pp. 1-50.
7. Skibinski G. L., Guskov N. and Zhou Dong. Cost effective multi-pulse transformer solutions for harmonic mitigation in AC drives. *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference*, 2003, pp. 1488-1497.
8. IEC 61000-3-12, Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤75 A per phase. 2011. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/4144>. Access 1 June 2020
9. Rahmani A., Deihimi A. Reduction of harmonic monitors and estimation of voltage harmonics in distribution networks using wavelet analysis and NARX. *Electr. Power Syst. Res.*, 2020, vol. 178, p. 106046.
10. Kashif M., et al. A fast time-domain current harmonic extraction algorithm for power quality improvement using three-phase active power filter. *Electr. Power Syst. Res.*, 2020, vol. 12, pp. 103539-103549.
11. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Kotlyarov V. Analysis of topologies of active four-quadrant rectifiers for implementing the industry 4.0 principles in traffic power supply systems. *International scientific journal «INDUSTRY 4.0»*, 2019, vol. 4, pp. 57-61.
12. Constantinescu M. D., Popescu M., Subtirelu G.-E. and Toma I.-C. Application of the Direct Power Control in a Three-Phase Shunt Active Power Filter System. *International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Craiova, Romania, 2023, vol. 38, pp. 1-6.
13. Kabalci Y. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 57, pp. 302-318.
14. Xu Y., Wang Z., Shen Y., Zou Z. and Deng F. An Improved Modulation Scheme of Isolated Matrix Converter for Common-Mode Voltage Reduction and DC-Bias Current Mitigation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2023, vol. 70, pp. 1-10.
15. Pandey D. C., Behera P. K. and Pattnaik M. Steady-State Analysis of Dual Active Bridge Converter with Single Phase Shift and Dual Phase Shift Modulation. *IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, Bhopal, India, 2023, pp. 1-6.

Відомості про авторів (About authors)

Войтович Юрій Сергійович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Промислова і біомедична електроніка»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3606-9539; e-mail: Yurii.Voitovych@khpi.edu.ua.

Voitovych Yurii – Ph. D., National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", senior lecturer of the "Industrial and Biomedical Electronics" department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3606-9539; e-mail: Yurii.Voitovych@khpi.edu.ua.

Стисло Богдан Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7057-3523; e-mail: Bohdan.Styslo@khpi.edu.ua.

Styslo Bohdan – Ph. D., National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", senior lecturer of the "Industrial and Biomedical Electronics" department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7057-3523; e-mail: Bohdan.Styslo@khpi.edu.ua.

Чмихова Оксана Володимирівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Промислова і біомедична електроніка»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-9198-9701; e-mail: Oksana.Chmykhova@khpi.edu.ua.

Chmykhova Oksana – Ph. D., National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", assistant professor of the "Industrial and Biomedical Electronics" department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-9198-9701; e-mail: Oksana.Chmykhova@khpi.edu.ua.

Плахтій Олександр Андрійович - кандидат технічних наук, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», м. Харків, Україна, ORCID: 0000-0002-1535-8991; e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com

Plakhtii Oleksandr - Ph. D., Ukrainian state university of railway transport, assistant professor of the "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics" department, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1535-8991; e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Войтович Ю. С., Стисло Б. О., Чмихова О. В., Плахтій О. А. Дослідження комутаційних процесів в 24-пульсному випрямлячі з електронним зсувом фаз на IGBT-транзисторах з зворотною блокуючою властивістю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 78-90. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.11.

Please cite this article as:

Voitovych Y., Styslo B., Chmykhova O., Plakhtii O. Investigation of commutation processes in a 24-pulse rectifier with electronic phase shift on IGBT transistors with reverse blocking capability. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 78-90, doi: 10.20998/2413-4295.2024.01.11.

*Надійшла (received) 02.12.2023
Прийнята (accepted) 01.03.2024*

УДК 621.314

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.12

ВДОСКОНАЛЕННЯ СТРУКТУРИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ АКТИВНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ З ФІКСОВАНОЮ ЧАСТОТОЮ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ РОБОТИ В РЕЖИМІ ДВОНАПРАВЛЕНОГО ПОТОКУ ЕНЕРГІЇ

Д. С. КРИЛОВ*, О. І. ХОЛОД

кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: denis.krylov@khi.edu.ua

АНОТАЦІЯ Об'єктивна необхідність в енергозбереженні та посиленні вимог до якості споживаної електроенергії змушує виробників перетворювальної техніки шукати нові схемотехнічні рішення та вдосконалювати алгоритми управління перетворювачами. Повною мірою це стосується і частотного електроприводу малої та середньої потужності. Його базою є структура, виконана на основі автономного інвертора напруги із широтно-імпульсною модуляцією, схема якого передбачає використання діодного некерованого випрямляча як джерела постійної напруги. Вона має суттєві недоліки, які можна повністю усунути активним керованим випрямлячем – джерелом напруги (АВДН), параметрична система управління яким забезпечує заданий рівень напруги у ланці постійного струму і нульове значення реактивної потужності при близькій до синусоїди формі струму на стороні мережі живлення. Але її вона має певні недоліки в режимі зміни напрямку потоку енергії та потребує вдосконалення. Тому розглянуто вдосконалення параметричної системи управління АВДН з фіксованою частотою модуляції для роботи в режимі двонаправленого потоку енергії між мережею живлення і навантаженням та проведено її моделювання. Запропоновано рішення, що забезпечують стійку роботу перетворювача з оновленою системою управління в усіх режимах роботи. Запропоновано оновлений алгоритм фазової корекції кута зміщення першої гармоніки мережного струму відносно напруги джерела живлення та вдосконалено алгоритм його отримання, покращено роботу регулятора вихідної напруги схеми АВДН. Результати моделювання показали, що вдосконалена параметрична система управління АВДН здатна забезпечити роботу силової схеми перетворювача з близьким до синусоїди струмом та нульовою реактивною потужністю на стороні мережі в усьому діапазоні зміни потужності, що споживає чи генерує навантаження, підтримуючи задане значення вихідної напруги в сталому режимі роботи при допустимих відхиленнях в перехідних режимах роботи.

Ключові слова: двонаправлений потік енергії; параметрична система управління; активний керований випрямляч; лінеаризація зворотного зв'язку; фазовий детектор; синусоїдальна модуляція з фіксованою частотою.

IMPROVEMENT OF THE STRUCTURE OF THE PARAMETERIC CONTROL SYSTEM OF AN ACTIVE RECTIFIER WITH A FIXED MODULATION FREQUENCY FOR OPERATION IN BIDIRECTIONAL ENERGY FLOW MODE

D. KRYLOV, O. KHOLOD

Department of industrial and biomedical electronics, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The objective need for energy saving and the strengthening of requirements for the quality of consumed electricity forces manufacturers of converting equipment to look for new circuit solutions and to improve the control algorithms of converters. This fully applies to low- and medium-power frequency electric drives. Its base is a structure made on the basis of an autonomous voltage inverter with pulse width modulation, the scheme of which involves the use of a diode uncontrolled rectifier as a source of constant voltage. It has significant disadvantages that can be completely eliminated by an active controlled rectifier - voltage source (AVDN), a parametric control system of which provides a set voltage level in the direct current circuit and a zero value of reactive power with a current form close to a sinusoid on the side of the power network. But it also has certain shortcomings in the mode of changing the direction of the energy flow and needs improvement. Therefore, the improvement of the parametric AVDN control system with a fixed modulation frequency for operation in the mode of bidirectional energy flow between the power network and the load was considered and its simulation was carried out. A solution that ensures stable operation of the converter with an updated control system in all operating modes is proposed. An updated algorithm for the phase correction of the offset angle of the first harmonic of the mains current relative to the voltage of the power source is proposed, and the algorithm for obtaining it has been improved, and the operation of the output voltage regulator of the AVDN circuit has been improved. The simulation results showed that the improved parametric AVDN control system is able to ensure the operation of the power circuit of the converter with a current close to a sinusoid and zero reactive power on the network side in the entire range of changes in the power that consumes or generates the load, maintaining the set value of the output voltage in a stable mode of operation at permissible deviations in transient modes of operation.

Keywords: bidirectional flow of energy; parametric control system; active controlled rectifier; feedback linearization; phase detector; sinusoidal modulation with a fixed frequency.

Вступ

Об'єктивна необхідність в енергозбереженні та посиленні вимог до якості споживаної електроенергії

змушує виробників перетворювальної техніки шукати нові схемотехнічні рішення та вдосконалювати алгоритми управління перетворювачами. Повною мірою це стосується і частотного електроприводу

малої та середньої потужності, що активно розвивається останніми роками [1,2]. Його базою є структура, виконана на основі автономного інвертора напруги із широтно-імпульсною модуляцією. Класична його схема, що передбачає використання діодного некерованого випрямляча як джерела постійної напруги для живлення трифазного мостового інвертора має суттєві недоліки [3]: спотворення форми мережного струму і неможливість роботи перетворювача в режимі двонаправленого обміну енергією між мережею живлення і навантаженням. Це знижує енергоефективність такої схеми, не даючи повністю розкрити її потенціал. Заміна діодного випрямляча активним керованим випрямлячем – джерелом напруги (АВДН) дозволяє повністю усунути всі недоліки діодного випрямляча у складі частотного електроприводу на основі АІН. При цьому ефект від його використання багато мірою буде залежати від алгоритму управління ключами. Їх можна розділити на алгоритми зі змінною і фіксованою частотою модуляції що володіють власними перевагами та недоліками. У разі використання активного випрямляча бажано, щоб АВДН та АІН використовували однакові алгоритми модуляції для кращого узгодження режимів роботи двох схем в єдиному перетворювачі [4-7].

У частотних перетворювачах малої та середньої потужності найбільшого поширення набув метод широтно-імпульсної модуляції з фіксованою частотою перемикання вентилів, що дозволяє спростити розрахунок вхідних та вихідних фільтрів [8] та тепловий розрахунок схеми. При цьому систему управління АВДН пропонують будувати за так званим «векторним» принципом, використовуючи параметри узагальнених векторів мережного струму і напруги, що представлені в обертових системах координат, для формування сигналу завдання *PWM* генератора. Такі структури повністю дозволяють розкрити весь потенціал АВДН. Однак вони складні в налаштуванні і реалізації та висувають підвищені вимоги до обчислювальних можливостей апаратної частини системи управління [9-11].

На практиці ж від АВДН у складі частотного електроприводу потрібно, частіше за все, лише забезпечити заданий рівень напруги у ланці постійного струму і нульове значення реактивної потужності при близькій до синусоїди форми струму на стороні мережі живлення. З цим повною мірою справляється запропонована авторами [12] параметрична система управління, що формує сигнали завдання *PWM* генератора, використовуючи складові напруги вхідного ланцюга перетворювача та формуючи фазову корекцію кута зміщення першої гармоніки мережного струму щодо напруги джерела живлення. Дослідження показали, що вона повністю виконує свої функції в широкому діапазоні зміни параметрів силової схеми та

споживаної потужності. Однак режим зміни напрямку потоку енергії у схемі потребує додаткового вдосконалення.

Мета роботи

Метою даної роботи є вдосконалення параметричної системи управління АВДН з фіксованою частотою модуляції для роботи в режимі двонаправленого потоку енергії між мережею живлення та навантаженням, а також моделювання роботи перетворювача з такою системою управління при зміні параметрів схеми та рівня і знаку потужності, що споживається нею.

Виклад основного матеріалу

Схема силових ланцюгів частотного електроприводу на основі АВДН – АІН повністю відповідає такій, що була розглянута авторами в [6, 8, 12]. Вона зображена на рис. 1 і складається з наступних компонентів: ЗН – трифазна мережа синусоїдальної змінної напруги u_M з власною індуктивністю L , включаючи додаткові реактори на вході активного випрямляча АВДН, виконаного за трифазною мостовою схемою на ключах знакозмінного струму, в ланцюг постійного струму ПН якого включена ємність C , що створює для навантаження близький до джерела напруги режим роботи. Навантаженням є АІН з ШІМ, що живить асинхронний двигун.

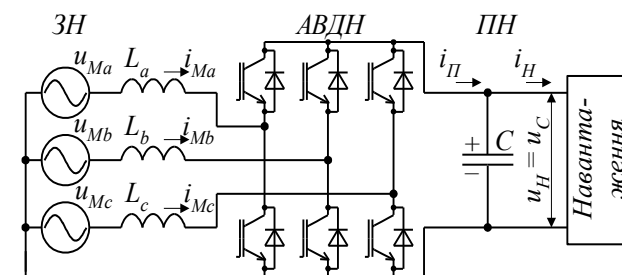


Рис. 1 – Структурна схема функціональних вузлів АВДН

Відомо [5-7], що фізика процесів, які протікають у кожній фазі трифазного АВДН під час його роботи, така сама, як і в двох інших фазах із часовим зсувом у 120 електричних градусів. Тому подальшу роботу схеми можна розглянути на прикладі контуру протікання струму в одній фазі, еквівалентна схема якого наведена на рис. 2.

Аналогічно до рис. 1, вона складається з джерела змінної напруги фази мережі живлення з миттєвим значенням u_M , миттєвої фазної напруги

на вході АВДН u_B та індуктивності на вході фази схеми L , через яку протікає фазний струм $i_M = i_L$.

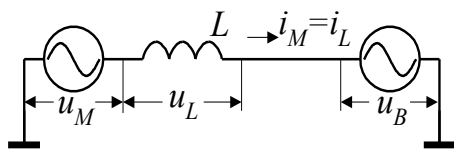


Рис. 2. Еквівалентна схема фази вхідного ланцюга АВДН

Напруга u_B формується під час роботи схеми АВДН в режимі ШІМ завдяки різнополярному періодичному підключенню напруги конденсатора ланки постійного струму u_C до фази живильної мережі. При цьому за період модуляції змінюється знак падіння напруги u_L вхідної індуктивності L та динаміка протікаючого крізь неї струму i_L , що дає можливість формувати необхідну форму та фазу струму джерела живлення.

Миттєві напруги в контурі рис. 2 пов'язані між собою законом Кірхгофа

$$u_M = u_L + u_B. \quad (1)$$

Зважаючи на те, що АВДН працює в режимі синусоїдальної ШІМ, формуючи близький до синусоїди струм мережі живлення у фазі (або протифазі в режимі рекуперації) з напругою джерела живлення, розглядатимемо принцип побудови системи управління АВДН, врахуванням лише перші гармоніки струмів та напруг у вхідному ланцюзі перетворювача. Їхні векторні діаграми для режимів прямого та зворотного потоку енергії через перетворювач при повній компенсації реактивної потужності, наведені на рис. 3.

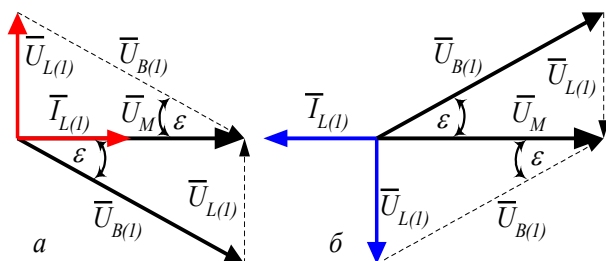


Рис. 3. Векторна діаграма вхідного ланцюга АВДН при компенсації реактивної потужності для: а – споживання енергії навантаженням; б – рекуперації енергії з навантаження в мережу живлення

З рис. 3 видно, що вектор першої гармоніки струму мережі $\bar{I}_{L(1)}$, що протікає через вхідний дросель фази перетворювача, співспрямований з вектором першої гармоніки фазної напруги мережі живлення \bar{U}_M в режимі споживання енергії та протиспрямований в режимі рекуперації. Вектор першої гармоніки падіння напруги на вхідному дроселі $\bar{U}_{L(1)}$ зрушений на кут, близький до 90 електричних градусів в бік випередження відносно струму мережі в обох режимах роботи та змінює свою фазу на протилежну при переході в режим рекуперації.

В [12] авторами було детально показано, що в АВДН з фіксованою частотою модуляції амплітуда і фаза першої гармоніки мережного струму отримується через формування необхідної форми і фази першої гармоніки напруги на вході АВДН. Для цього треба сформувати відповідну йому форму і фазу управляючої напруги на вході PWM генератора системи управління.

З рис. 3 для обох режимів роботи схеми справедливо співвідношення

$$\bar{U}_{B(1)} = \bar{U}_M - \bar{U}_{L(1)}, \quad (2)$$

згідно до якого, при синусоїдальній та незмінній напрузі мережі сформувати необхідну амплітуду та фазу напруги на вході перетворювача можна, задавши потрібну амплітуду та фазу першої гармоніки падіння напруги вхідної індуктивності. Амплітуду може формувати окремий регулятор, а фаза, згідно до рис. 3, повинна дорівнювати ± 90 електричних градусів залежно від напрямку потоку енергії. Але з'ясувалось, що це справедливо лише при номінальному режимі роботи схеми. Тому, для роботи в широкому діапазоні змін параметрів схеми, в [12] авторами було запропоновано систему управління з функцією корекції кута зсуву першої гармоніки мережного струму відносно напруги живлення. Вона добре зарекомендувала себе в статичному режимі роботи при передачі енергій від мережі до навантаження. Її структурна схема наведена на рис. 4.

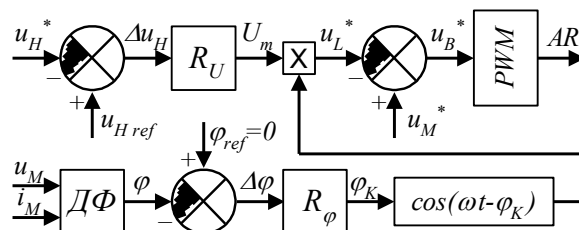


Рис. 4 – Структурна схема системи управління АВДН з фазовою корекцією

Коротко нагадаємо принцип її роботи: сигнал різниці між заданим та поточним значенням вихідної напруги подається на вхід регулятора, що формує сигнал U_m , пропорційний амплітуді падіння напруги вхідного дроселя. Його відносне миттєве значення u_L^* отримуємо множенням U_m на функцію косинуса з урахуванням фазової корекції φ_K . Віднявши u_L^* від відносної фазної напруги мережі u_M^* , отримаємо відносне значення сигналу завдання *PWM* генератора u_B^* . Сигнал фазової корекції φ_K формується окремим регулятором, що діє у функції різниці між заданим φ_{ref} та поточним кутом зсуву φ між напругою та струмом мережі. Сигнал φ формується схемою фазового детектора.

Базовими величинами для відносних значень струмів і напруг прийнятні амплітудні значення фазного струму та напруги джерела живлення для входу та амплітуду лінійної напруги джерела для виходу схеми.

Проаналізувавши фізику роботи схеми АВДН, векторні діаграми рис. 3 та принцип роботи системи управління рис. 4 можна зазначити, що при неномінальних режимах роботи фактичний фазовий зсув струму вхідного дроселя відносно падіння напруги на ньому буде меншим, ніж 90 електричних градусів. Фактори, що впливають на це, проаналізовані в [12]. Однак в параметричній структурі рис. 4 фаза сигналу u_L^* жорстко задається функцією косинуса. Тому і потрібно введення сигналу корекції φ_K , який в режимі споживання енергії зменшує фазовий зсув сигналу u_L^* відносно u_M^* для компенсації реактивної потужності на вході схеми. Це ілюструє рис. 5.

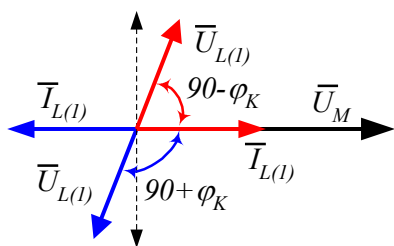


Рис. 5 – Корекція фази сигналу $\bar{U}_{L(1)}$

В режимі рекуперації змінюється напрям потоку енергії в схемі, що, як було зазначено раніше, призводить до зміни напрямку $\bar{I}_{L(1)}$ та $\bar{U}_{L(1)}$ на протилежний. При цьому навантаження у вигляді автономного інвертора напруги починає працювати в режимі підвищувального ШПП, накачуючи енергією конденсатор проміжної ланки постійного струму в результаті чого напруга на ньому починає зростати. В структурі частотного перетворювача рис. 1 функція підтримки незмінної напруги на конденсаторі лежить на системі

управління АВДН. Тому регулятор R_U , намагаючись зменшити напругу в ланці постійного струму, змінює знак на своєму виході на протилежний, фактично перевертаючи фазу u_L^* , що повністю відповідає теорії роботи схеми АВДН.

Однак в режимі рекуперації енергії зміна полярності сигналу u_L^* буде вимагати від структури рис. 4 не зменшення, а збільшення фазового зсуву сигналу u_L^* відносно u_M^* для компенсації реактивної потужності на вході схеми (див. рис. 5), чого в ній передбачено не було. Тому для роботи АВДН з можливістю організації двонаправленого потоку енергії структуру параметричної системи управління рис. 4 треба доповнити функцією зміни знаку сигналу фазової корекції φ_K в залежності від режиму роботи схеми. Ознакою цього може служити, наприклад, зміна полярності струму навантаження в проміжній ланці i_H , або ж зміна полярності сигналу на виході регулятора напруги U_m .

Вдосконалення потребують також вхідні контури обох регуляторів для підвищення якості їхньої роботи в перехідних режимах.

Регулятор напруги ланки постійного струму R_U повинен підтримувати незмінну напругу на конденсаторі на рівні, що перевищує амплітуду лінійної напруги джерела живлення що найменше на 15% в усіх режимах роботи схеми, додаючи в режимі споживання, або віднімаючи в режимі рекуперації, частку енергії, що проходить крізь нього. Однак і сам конденсатор, згідно до фізики його роботи, накопичує в собі енергію, яку можна визначити як

$$E_C = C \frac{u_C^2}{2}, \quad (3)$$

де C – ємність конденсатора; u_C – напруга конденсатора на виході АВДН рис. 1.

Миттєва потужність конденсатора визначається миттєвими активними потужностями джерела живлення та навантаження і є похідною від (3) за часом

$$\frac{dE_C}{dt} = \frac{C}{2} \frac{du_C^2}{dt} = p_M - p_H. \quad (4)$$

Нелінійність виразу (4) відносно напруги u_C ускладнює роботу регулятора R_U . Тому треба провести лінеаризацію зворотного зв'язку, ввівши для цього в (4) нову змінну $W = u_C^2$ і отримавши вираз

$$\frac{C}{2} \frac{dW}{dt} = p_M - p_H, \quad (5)$$

що буде лінійним відносно W . Використавши енергію конденсатора для регулювання напруги на ньому, отримаємо лінійний регулятор з покращеними, відносно рис. 4, характеристиками.

Регулятор кута фазової корекції R_φ діє в функції різниці між кутом завдання та поточним значенням кута зсуву між струмом та напругою фази на вході перетворювача, який формується фазовим детектором для кожної фази. Схеми фазових детекторів, зазвичай, мають затримку у часі вихідного сигналу на період (або його частину) напруги живлення, що негативно впливає на динамічні характеристики регулятора R_φ .

Позбавитись цього недоліка можна, якщо в якості змінної величини використовувати миттєве значення сумарної реактивної потужності на вході перетворювача, яке, за умовою роботи схеми, повинно дорівнювати нулю в усіх режимах. Однак відомо, що миттєва реактивна потужність є змінною складовою сумарної потужності мережі змінного струму. Тому для визначення її сумарної величини в трифазній симетричній системі необхідно використовувати спеціальні підходи. Найбільш простим та легким в реалізації, на думку авторів, є спосіб знаходження її величини за наступним виразом

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a \cdot u_{bc} + i_b \cdot u_{ca} + i_c \cdot u_{ab}). \quad (5)$$

Це дозволить отримувати значення сумарної миттєвої реактивної потужності на вході АВДН без зайвих затримок, використавши лише поточні миттєві значення струмів та напруг вхідного ланцюга схеми та прості математичні операції, що покращить динамічні характеристики регулятора кута фазової корекції та системи управління в цілому.

Вдосконалена структурна схема параметричної системи управління АВДН наведена на рис. 6.

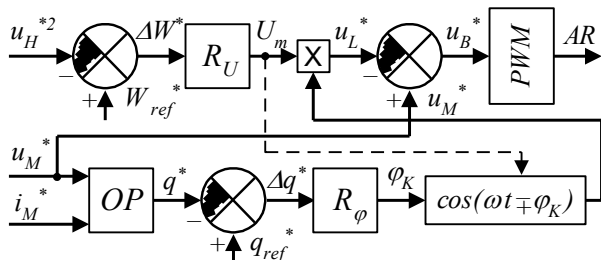


Рис. 6 – Вдосконалена структурна схема системи управління АВДН з фазовою корекцією

Принцип її роботи відрізняється від структури рис. 4 тим, що на вхід регулятора напруги R_U подається різниця між відносною заданою енергією вихідного конденсатора АВДН та її відносним поточним значенням, пропорційним квадрату напруги на конденсаторі ланки постійного струму схеми. Регулятор кута фазової корекції R_φ діє в функції різниці між заданим та поточним значенням відносно миттєвої реактивної потужності на вході схеми, формуючи на своєму виході сигнал φ_K , що корегує фазу функції косинуса в обох напрямках згідно до знаку виходу регулятора R_U .

Ці зміни дозволять забезпечити стійку роботу схеми в статичному та динамічному режимах роботи при двонаправленому потоці енергії в широкому діапазоні зміни параметрів схеми і споживаної нею потужності. Перевіримо це моделюванням.

Обговорення результатів

Зовнішній вигляд математичної моделі силових ланцюгів частотного перетворювача за структурою рис. 1, створений в програмному середовищі *Matlab / Simulink*, наведено на рис. 7.

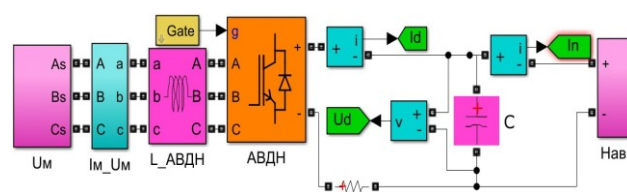


Рис. 7 – *Matlab* модель АВДН

Прийmemo параметри моделі таким ж, як і для попереднього дослідження, а саме [12]: еквівалентне навантаження, що може споживати чи генерувати активну потужність, підтримуючи її рівень в діапазоні ± 315 кВт, живиться від АВДН, працюючого із синусоїдальною ШІМ на частоті модуляції у 4 кГц, через проміжну ланку постійного струму з ємністю конденсатора 28 мФ. АВДН підключений до трифазної мережі змінного струму з рівнем лінійної напруги 0.4 кВ та потужністю короткого замикання 150 МВА через вхідні дроселі, індуктивність яких в даному дослідженні прийнята на рівні 200 мкГн.

Зовнішній вигляд математичної моделі системи управління АВДН, що повністю відповідає структурі рис. 6, наведено на рис. 8

Машинограми, що ілюструють роботу силової схеми та системи управління АВДН при зміні потужності навантаження в обох напрямках, наведені на рис. 9, а-г.

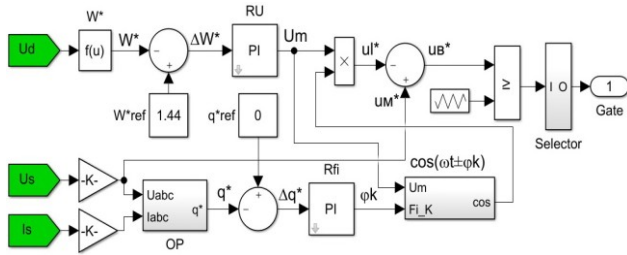


Рис. 8 – Matlab модель запропонованої системи управління АВДН

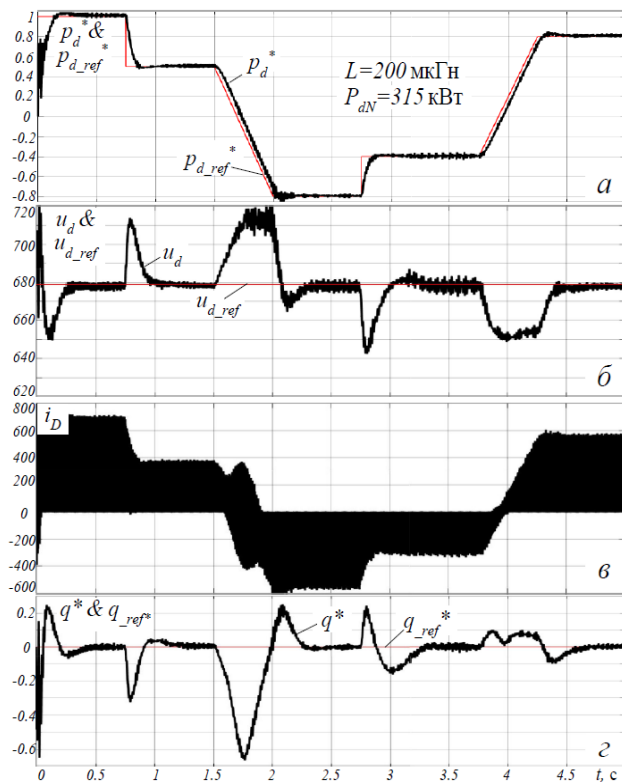


Рис. 9. Машинограми роботи схеми АВДН

На рис. 9, а показано сигнал відносної миттєвої активної потужності навантаження, що змінюється за величиною та полярністю згідно до завдання. При цьому регулятор потужності відпрацьовує завдання коректно.

На рис. 9, б показаний сигнал миттєвої напруги на виході АВДН та сигнал її завдання, який при заданій лінійній напрузі джерела живлення 400 В становить 678.8 В. Видно, що при сталому режимі роботи регулятор напруги підтримує її рівень у відповідності до завдання, а в перехідних режимах відхилення рівня миттєвої напруги від завдання не перевищує 8%.

На рис. 9, в показано миттєве значення струму на виході АВДН. Воно промодульовано високою частотою і змінюється за величиною та полярністю.

На рис. 7, г показано відносне миттєве значення сумарної реактивної потужності на вході схеми АВДН. Видно, що в сталому режимі роботи її величина прагне до обраного рівня завдання – нуля.

На рис. 10, а-б показані миттєві значення струму та напруги фази мережі живлення а в режимі споживання (рис. 10, а) та рекуперації (рис. 10, б) потужності навантаження на рівні ± 250 кВт.

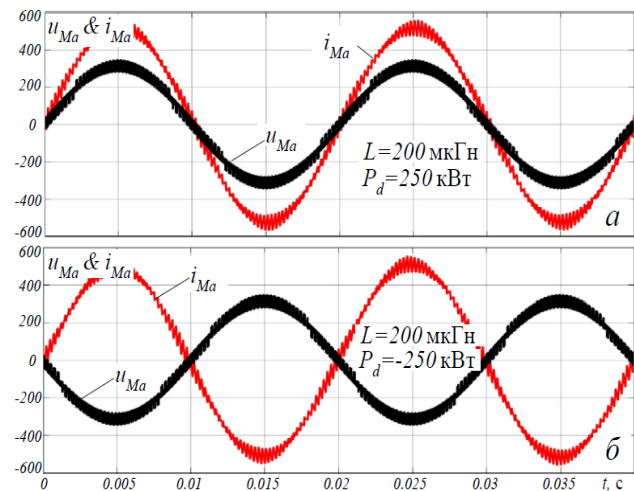


Рис. 10. Машинограми струму та напруги фази а АВДН

При цьому фазний струм має форму, близьку до синусоїди і знаходиться у фазі або в протифазі з фазною напругою джерела живлення в сталому режимі роботи, що свідчить про нульовий рівень реактивної потужності на вході схеми.

Модельовання роботи АВДН з вдосконаленою параметричною системою управління показало його здатність забезпечувати близький до синусоїди струм джерела при нульовому споживанні реактивної потужності в усьому діапазоні зміни потужності, що споживає чи генерує навантаження, підтримуючи при цьому задане значення вихідної напруги в сталому режимі роботи при допустимих відхиленнях в перехідних режимах роботи. Машинограми, наведені на рис. 9-10 свідчать про коректну роботу АВДН з фіксованою частотою модуляції і запропонованою системою управління.

Висновки

В статті розглянуті основні моменти, що характеризують фізичні процеси роботи трифазного АВДН з фіксованою частотою модуляції як в режимі споживання, так і рекуперації енергії. Виявлено основні недоліки розробленої авторами

раніше параметричної системи управління та запропоновано низку технічних рішень, що усувають їх, забезпечуючи стійку роботу перетворювача з оновленою системою управління в режимі двонаправленого потоку енергії між мережею живлення та навантаженням при зміні параметрів схеми та потужності, що споживається нею. Запропоновано оновлений алгоритм фазової корекції кута зміщення першої гармоніки мережного струму відносно напруги джерела живлення та вдосконалено алгоритм його отримання. Вдосконалено роботу регулятора вихідної напруги схеми АВДН. Математичне моделювання перетворювача з оновленою системою управління в середовищі Matlab/Simulink дозволяє зробити такі висновки:

- вдосконалена параметрична система управління АВДН здатна забезпечити роботу силової схеми перетворювача з близьким до синусоїди струмом та нульовому реактансі на стороні мережі в усьому діапазоні зміни потужності, що споживає чи генерує навантаження, підтримуючи задане значення вихідної напруги в сталому режимі роботи при допустимих відхиленнях в перехідних режимах роботи;

- коректність роботи силової схеми та вдосконаленої параметричної системи управління ілюструється машинограмами, що отримані при зміні потужності навантаження в обох напрямках протягом єдиного інтервалу часу.

Список літератури

1. Cheng H., Yuan W., Wang C., Zhao Z., Hao J. A Modified Carrier-Based PWM Strategy for Common Mode Voltage Elimination and Neutral Point Voltage Balance in a Unidirectional Three-Level Converter for AC Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2024. P. 1-12. doi: 10.1109/TIE.2024.3349568.
2. Hwang D.-Y., Joo D.-M., Gu B.-G. Analysis of Inverter Loss Improvement According to Si-IGBT and SiC-MOSFET Utilization of 150kW Inverter for EV Propulsion. *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*. 2024. 73 (1). P. 63 – 68. doi: 10.5370/KIEE.2024.73.1.63.
3. Zekun Zhang. Comparison between bridge diode rectifier and other rectifier modes. *AIP Conf. Proc.* 13 February 2019, 2073 (1). doi: 10.1063/1.5090721.
4. Yao X., Ma H., Wang J., Huang S., Zhang X. New Switching Table Direct Power Control for Three-phase Voltage Source PWM Rectifier. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. 2023. 43 (16). P. 6407 – 6417. doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220651.
5. Malinowski M. *Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*. Warsaw: Warsaw University of Technology. 2001. 127 p.
6. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types, *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, – Turkey. 2020. P. 273–278. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.

- (IEPS). Istanbul, – Turkey. 2020. P. 273–278. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.
7. Premkumar K., Kandasamy P., Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S.B. Three-phase rectifier control techniques: A comprehensive literature survey. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2020. Vol. 9. No 1. P. 3183–3188.
8. Krylov D. S., Kholod O. I. Determination of the input filter parameters of the active rectifier with a fixed modulation frequency. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. (4). P. 21–26. doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.03.
9. Zhang C., Yu S., Ge X. A Stationary-Frame Current Vector Control Strategy for Single-Phase PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68. No. 3 P. 2640–2651. doi: 10.1109/TVT.2019.2895290.
10. Nandhini E., Sivaprakasam A. A Review of Various Control Strategies Based on Space Vector Pulse Width Modulation for the Voltage Source Inverter. *IETE Journal of Research*. 2022. 68 (5). P. 3187-3201. doi: 10.1080/03772063.2020.1754935.
11. Kumar R., Gupta R. A., Bhangale S. V. Vector control techniques for induction motor drive: A review. *International Journal of Automation and Control*. 2009. 3 (4). P. 284-306. doi: 10.1504/IJAAC.2009.026778.
12. Крилов Д. С., Холод О. І. Параметрична система керування трифазним активним випрямлячем з фіксованою частотою модуляції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 11-17. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.02.

References (transliterated)

1. Cheng H., Yuan W., Wang C., Zhao Z., Hao J. A Modified Carrier-Based PWM Strategy for Common Mode Voltage Elimination and Neutral Point Voltage Balance in a Unidirectional Three-Level Converter for AC Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, pp. 1-12, doi: 10.1109/TIE.2024.3349568.
2. Hwang D.-Y., Joo D.-M., Gu B.-G. Analysis of Inverter Loss Improvement According to Si-IGBT and SiC-MOSFET Utilization of 150kW Inverter for EV Propulsion. *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2024, 73 (1), pp. 63 - 68, doi: 10.5370/KIEE.2024.73.1.63
3. Zekun Zhang. Comparison between bridge diode rectifier and other rectifier modes. *AIP Conf. Proc.* 13 February 2019, 2073 (1). doi: 10.1063/1.5090721.
4. Yao X., Ma H., Wang J., Huang S., Zhang X. New Switching Table Direct Power Control for Three-phase Voltage Source PWM Rectifier. *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2023, 43 (16), pp. 6407 - 6417, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220651.
5. Malinowski M. *Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*. Warsaw: Warsaw University of Technology. 2001. 127 p.
6. Krylov D., Kholod O., Radohuz S. Active rectifier with different control system types, *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Istanbul, – Turkey. 2020. pp. 273–278, doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263226.

7. Premkumar K., Kandasamy P., Vishnu Priya M., Thamizhselvan T., Ron Carter S.B. Three-phase rectifier control techniques: A comprehensive literature survey. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 2020, Vol. 9, No 1, pp. 3183–3188.
8. Krylov D. S., Kholod O. I. Determination of the input filter parameters of the active rectifier with a fixed modulation frequency. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, (4), pp. 21–26, doi: 10.20998/2074-272X.2022.4.03.
9. Zhang C., Yu S., Ge X. A Stationary-Frame Current Vector Control Strategy for Single-Phase PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, Vol. 68, No. 3, pp. 2640–2651, doi: 10.1109/TVT.2019.2895290.
10. Nandhini E., Sivaprakasam A. A Review of Various Control Strategies Based on Space Vector Pulse Width Modulation for the Voltage Source Inverter. *IETE Journal of Research*, 2022, 68 (5), pp. 3187-3201, doi: 10.1080/03772063.2020.1754935.
11. Kumar R., Gupta R. A., Bhangale S. V. Vector control techniques for induction motor drive: A review. *International Journal of Automation and Control*, 2009, 3 (4), pp. 284-306, doi: 10.1504/IJAAC.2009.026778.
12. Krylov D., Kholod O. Parametric control system of a three-phase active rectifier with a fixed modulation frequency. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4 (14), pp. 11–17, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.02.

Відомості про авторів (About authors)

Крилов Денис Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis.krylov@khpi.edu.ua.

Denis Krylov – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-1025-3939>; e-mail: denis.krylov@khpi.edu.ua.

Холод Ольга Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; e-mail: Olha.Kholod@khpi.edu.ua.

Olga Kholod – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of of industrial and biomedical electronics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0036-0239>; Olha.Kholod@khpi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крилов Д. С., Холод О. І. Вдосконалення структури параметричної системи управління активним випрямлячем з фіксованою частотою модуляції для роботи в режимі двонаправленого потоку енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 91-98. doi:10.20998/2413-4295.2024.01.12.

Please cite this article as:

Krylov D., Kholod O. Improvement of the structure of the parametric control system of an active rectifier with a fixed modulation frequency for operation in bidirectional energy flow mode. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 91–98, doi:10.20998/2413-4295.2024.01.12.

*Надійшла (received) 03.01.2024
Прийнята (accepted) 08.03.2024*

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

- Лис С., Юрасова О., Галянчук І.* Аналіз кінцево-різницевої апроксимації коду «FLOW» при виконанні проектних розрахунків параметрів першого та другого контурів реактора ВВЕР 3
- Петров С. О., Данильченко Д. О., Куценко С. А., Фалалєєва Т. В., Петрова Ю. В., Мінакова К. О.* Приклад синергії підходів зеленої хімії та зеленої енергетики 11

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

- Марусенко О. М., Мстельов В. О., Овсяніков В. В., Риженко А. С.* Розробка десктопного застосунку для e-mail маркетингу 20
- Попович Б. Р., Заволодько Г. Е.* Сервіс створення тестів на основі штучного інтелекту 26

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Витяганець В. С., Пітак І. В.* Аналіз конструктивного оформлення шахтних печей та дослідження високоякісного продукту, отриманого в ході випалу 31
- Григоренко І. В., Григоренко С. М., Андренко Д. О., Кубрик Б. І.* Система контролю технології виробництва крабових паличок з нечіткою логікою 42
- Калугіна І. М., Поплавська С. О.* Структурно-механічні властивості мусу з фейхоа 49
- Нечипоренко Д. І., Новожилова Т. Б., Сакун А. О., Пономаренко Є. Д.* Шляхи зниження енерговитрат а процесі випаровування розчинів у випарних апаратах 58
- Онищенко В. М., Янчева М. О., Онищенко А. В., Інжиянц С. Т.* Передгідролізні зміни водопоглинання яловичих черев під впливом кислотної обробки 65
- Сова Н. А., Коваленко Н. В.* Розробка рецептури грильжних цукерок на основі насіння олійних культур. 70

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

- Войтович Ю. С., Стисло Б. О., Чмихова О. В., Плахтій О. А.* Дослідження комутаційних процесів в 24-пульсному випрямлячі з електронним зсувом фаз на IGBT-транзисторах з зворотною блокуючою властивістю 78
- Крилов Д. С., Холод О. І.* Вдосконалення структури параметричної системи управління активним випрямлячем з фіксованою частотою модуляції для роботи в режимі двонаправленого потоку енергії 91

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

- Lys S., Yurasova O., Galyanchuk I.* Analysis of finite-difference approximation of code «FLOW» in performing design calculations of parameters in the primary and secondary circuits of VVER RP 3
- Petrov S., Danylchenko D., Kutsenko S., Falalieieva T., Petrova Y., Minakova K.* An example of the synergy of the approaches of green chemistry and green energy 11

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

- Marusenko O., Mietielov V., Ovsianikov V., Ryzhenko A.* Development of a desktop application for e-mail marketing 20
- Popovich B., Zavolodko G.* AI-based test creation service 26

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Vytiaganets V., Pitak I.* Analysis of the structural design of mine furnaces and research of the high-quality product obtained during firing process 31
- Hryhorenko I., Hryhorenko S., Andrenko D., Kubrik B.* Technology control system for crab stick vibration with fuzzy logic 42
- Kalugina I., Poplavskaya S.* Structural and mechanical properties of feijoa mousse 49
- Nechiporenko D., Novozhilova T., Sakun A., Ponomarenko E.* Ways to reduce energy consumption in the evaporation process of solutions in evaporation apparatus 58
- Onishchenko V., Yancheva M., Onyshchenko A., Inzhyyants S.* Prehydrolysis changes of beef rounds water absorption under the acid treatment effect 65
- Sova N., Kovalenko N.* Development of a recipe for grillage candy based on oil seeds 70

MODERN INSTRUMENTATION TECHNOLOGY

- Voitovych Y., Styslo B., Chmykhova O., Plakhtii O.* Investigation of commutation processes in a 24-pulse rectifier with electronic phase shift on IGBT transistors with reverse blocking capability 78
- Krylov D., Kholod O.* Improvement of the structure of the parameteric control system of an active rectifier with a fixed modulation frequency for operation in bidirectional energy flow mode 91

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ".
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

№ 1(19)' 2024

Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна
Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна
С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, проф. Р. С. Томашевський

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsmi@khi.edu.ua

Підп. до друку «01» квітня 2024 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 7,2. Облік.вид.арк. 4,0.
Тираж 50 прим. Зам. № 435. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
