Czech technical University in Prague

MODERN ENGINEERING RESEARCH: TOPICAL PROBLEMS, CHALLENGES AND MODERNITY

Collective monograph

Prague,
Czech
2020

Recommended for publication
by the Czech technical University in Prague

Head of editorial board:
doc. RNDr. **Vojtěch Petráček**, CSc, Czech Technical University in Prague

Modern engineering research: topical problems, challenges and modernity : Collective monograph. Riga : Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2020. 524 p.

ISBN 978-9934-588-47-1 © Czech technical University in Prague, 2020

CONTENTS

Application of hollow cathode glow discharge
in the processes of thing metal films deposition
Bolotov M. G. 1

A modern technology of teaching and
testing microcontroller system designers
Bondarenko V. E. 22

Принципи, методи та прийоми просторової організації
містобудівної системи закладів охорони здоров'я
Булах І. В. 45

The method of expressing the uncertainty of dynamic measurements
Vasilevskyi O. M., Didych V. M. 63

Особливості технології плавлених сирів лікувально-профілактичного
спрямування із кріопорошком «Буряк»
Гачак Ю. Р., Гутий Б. В. 84

Electric insulation technologies and characteristics of micro-arc
oxidation of aluminum alloys of diamond grinding wheel wrameworks
Gutsalenko Yu. G. 106

Моделі і методи представлення архітектурних рішень
критичної ІТ-інфраструктури
Дорогий Я. Ю. 127

Формирование композиционных материалов при изготовлении
водоразрушаемых формообразующих элементов
Кудрявцев П. Г. 156

Prospects for the use of alcohol infusions
in alcoholic beverage technologies for restaurants
Kuzmin O. V., Rudyi V. V. 211

Нанотехнологія та підготовка сучасного інженера
у світлі реалізації принципів і завдань Болонського процесу
Малишев В. В., Габ А. І. 231

Екологічні проблеми сталого розвитку та збереження
навколишнього середовища в контексті навчання студентів
Малишев В. В., Шахнін Д. Б. 249

Оцінка ефективності моделі параметричного синтезу
для вибору елементної бази систем управління
технологічними процесами виробництва РЕА
Мосьпан Д. В., Фомовська О. В. 266

Discrete-pulsed energy input (DPIE) is a perspective way to develop
resource and energy saving technologies in the food industry
Obodovych O. M., Sydorenko V. V. 299

Магніторезистивні властивості плівкових
матеріалів електроніки з різною архітектурою
Однодворець Л. В., Проценко І. Ю. 317

Проект автомобільної системи із силовим збудженням
коливань у технологічній платформі
Петров Л. М., Осєнчінін М. Г. 336

Вплив різних методів термічної обробки на технологію
м'ясних делікатесів спеціального призначення
Пешук Л. В., Сімонова І. І. 351

Development and implementation methods multicriteria evaluation
of efficiency energy saving activities in the field of heat supply
Polyvianchuk A. P., Belousov I. V., Semenenko R. A. 370

Main directions of traffic management
in Ukraine's international transport systems
Prokudin G. S., Chupaylenko O. A. 397

Development of vanadium oxide zirconium silicate catalyst
for reaction of propane dehydrogenation
Redkina A. V., Konovalova N. D. 416

Управленческие задачи обеспечения эффективного
функционирования и развития производственной организации
Савенко В. И., Полосенко А. В. 442

Impulse milk homogenisation
Samoichuk K. O., Palianychka N. O. 460

Імовірнісний розрахунок сталевих конструкцій рам
Чичуліна К. В., Чичулін В. П. 480

Providing environmental safety in the conditions
of the dense road network
Sheludchenko L. S., Semenyshena R. V. 498

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.1

APPLICATION OF HOLLOW CATHODE GLOW DISCHARGE IN THE PROCESSES OF THING METAL FILMS DEPOSITION

Bolotov M. G.

INTRODUCTION

Thin metal films are widely used in various fields of modern industry. However, the most widespread use thin-film elements have got in the different electronics technological processes, for instance, in manufacturing of semiconductor devices, in laser and nonlinear optics to provide polarizing, illuminating or mirror properties to optical elements etc.

Currently there are two main groups of methods for deposition of thin metal film coatings: chemical vapor deposition (CVD) and physical vapor deposition (PVD) which differentiate from each other with the process of obtaining a film-forming flux of atoms, ions or molecules. Nowadays, much attention is paid to physical vapor deposition (PVD) methods in which the atoms and metal molecules required for the synthesis of coatings are obtained by means of processes involving the evaporation of a target[1]. The main representatives of this group of methods are the sputtering by the cathode's spots of vacuum arc discharge, electron and ion beams, thermal vacuum evaporation, magnetron sputtering and so on.

The experience of industrial application of such technologies, made it possible to identify along with the advantages their main cons, mainly due to the low deposition rate, poor coating uniformity, poor adhesion to the substrate surface, limited processing surfaces, and the like.

Recently, a gas-discharge plasma of abnormal glow discharge with a cold cathode in crossed electric and magnetic fields at pressures below 1 Pa for generating of necessary fluxes of atoms and molecules in order to obtain metal film layers is been used. The results of studies performed

[1] Plasma assisted physical vapor deposition processes: A review / R.F. Bunshah, C.V. Deshpandey. J. Vac. Sci. and Technol., A3 (3), 1985, p. 553–560.

in[2] and[3] showed that the usage of low-pressure gas-discharge plasma initiated in a magnetic field allows to obtain of metal coatings in thickness close to homogeneous on substrates with a large surface area. The high sputtering rate, the absence of overheating of the substrate's surface, the relatively low degree of contamination of the films makes this method a very effective source of directional atoms and metal ions suitable for deposition of coatings.

At the same time, there is no any data regarding the usage as a source of spray particles for the cultivation of metallic films on dielectric substrates of low-temperature ionized plasma of hollow cathode glow discharge without the applied peripheral magnetic field at the traditional pressures of 1 to 100 Pa. The simplicity of the design, the long life expactancy of the target (cathode) between replacements, the low cost of the equipment compared to the magnetron systems have made it quite economically effective and relevant to investigate the usage of hollow cathode glow discharge for thin metal films deposition.

1. Experimental procedure

As a source of ionized plasma of glow discharge (further GD), burning in the hollow cathode is used. A diode plasmoionic discharge scheme in which the voltage was applied between the hollow cathode (material of the future film) and the anode was implemented (Fig. 1).

The processes of formation and growth of thin-film metal coatings using gas-discharge technologies are determined by the coherence of a number of factors: the size and relative spatial position of the target and the substrate surface, the pressure in the vacuum chamber, the current and voltage in the discharge gap, the deposition time, etc[4,5].

---

[2] Болбуков В.П. Распыление мишени на дне полого катода источника быстрых молекул газа в неоднородном магнитном поле. *Вестник МГТУ «СТАНКИН».* 2014. № 2. С. 111–117.

[3] Метель А.С., Григорьев С.Н. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов: физика, техника, применения. Москва : ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К». 2005. 296 С.

[4] Bolotov G.P., Bolotov M.G., Prybytko I.O., Kharchenko G.K. "Diagnosis of plasma glow discharge energy parameters in the processes of treatment small diameter long tubes", in II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), Kharkiv., IEEE. 2016, pp. 116–119. DOI: 10.1109/YSF.2016.7753815

[5] CVD-processes by hollow cathode glow discharge / A. Hellmich, T. Jung, A. Kielhorn, M Ribland. *Surf. Coat. Technol.* 1998, V.98, p. 1541–1546.

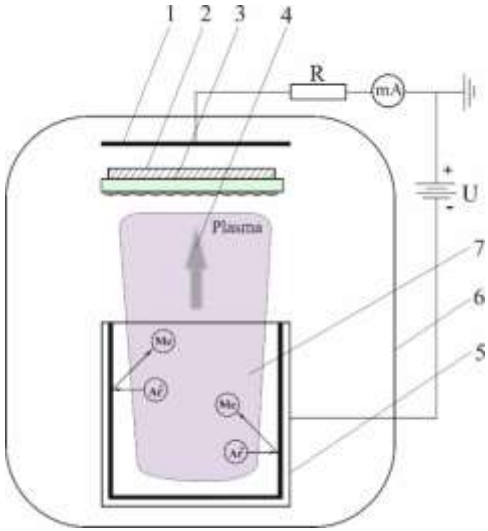


Fig. 1. Experimental scheme: 1 – anode; 2 – support; 3 – glass substrate; 4 – the direction of the evaporated metal; 5 – hollow cathode; 6 – vacuum chamber; 7 – glow discharge plasma

In this regard, the purpose of our research was determination the influence of these technological parameters on the thickness of the coating layer, the deposition rate and the adhesion value of films with a glass base during deposition in low-temperature plasma of a hollow cathode GD.

The influence of the dimensions of the cathode cavity's original aperture on the thickness of film layer was determined using cathodes with a diameter of 40 mm and 20 mm with a surface area of 5024 mm^2 and 2512 mm^2, respectively. The height of target (cathode) in both cases was 40 mm. The diameter of the anode ring remained unchanged during the studies and was 50 mm. Thus, the surface anode's area was 300 mm^2.

The influence of the technological mode parameters of deposition was determined by alternating them within the following limits: the distance of the cathode substrate $L_{c\text{-}s}$ = 5… 30 mm, the discharge current I_d = 25… 100 mA, with the voltage on the electrodes fluctuating within 400… 800 V. The deposition was carried out in argon environment at the gas pressures of 26… 60 Pa. The deposition time varied from 15 to 60 min. Before deposition, the training of the emitting surface of the

cathode was carried out at a current of 15 mA in argon medium for 2 min. in order to clean it up from various contaminants and creating of free release of the target atoms. The substrate was also pre-treated by the chemical etching in hydrofluoric acid for 1 min. and then washed in distilled water.

The adhesive strength of the copper films with the glass substrate was determined by the method of indentation in accordance with the methodology described in[6]. Fig. 2 show the scheme of installation for determining the adhesion value of thin films with the substrate surface.

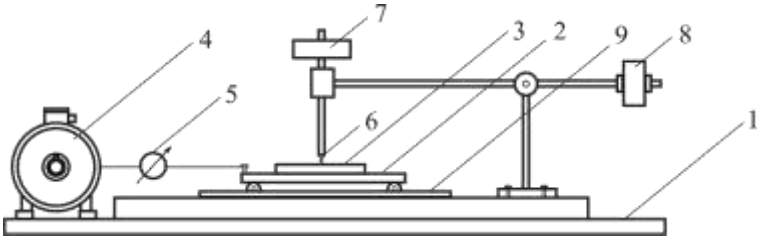


Fig. 2. Scheme of device for determination of coatings adhesive properties: 1 – table; 2 – movable platform; 3 – sample; 4 – electric motor; 5 – dynamometer; 6 – indenter; 7 – vertical load; 8 – counterweight; 9 – directing rails

The basis of this technique is the assumption that the adhesion of the coating to the substrate is provided by the layers directly adjacent to it. The adhesive strength of the copper film with the glass substrate can be calculated by the following equation:

$$F_{adh} = F_1 - F_2 - F_3 , \qquad (1)$$

where F_1 - the force required to move the indenter through the coating under a vertical load P_1, when a coating remains on the trace, the amount of which does not exceed 5% of the total trace area of the indenter; F_2 – the force required to move the indenter through the coating under vertical load P_2 when, on the indenter track, the clear glass is not less than 5% of the total area of the trace; F_3 - force arising from the movement of the indenter head on glass under vertical load $P_1 – P_2$.

[6] Физика тонких металлических и полупроводниковых слоев. *Успехи физических наук*. Т. LII. Вып. 4, 1954, с. 561–602.

The adhesive strength is determined by the equation:

$$P_{adh} = \frac{F_{adh}}{S}, \tag{2}$$

where S – area released by the indenter on the glass during its passage in 1 sec was determined by follow equation:

$$S = d\frac{L}{t}, \tag{3}$$

where d – the track width from the indenter needle; L – the total length of the track; t – move time.

2. Deposition of thing metal films in low temperature plasma of hollow cathode glow discharge

Fig. 3 shows the dependence of the thickness of the copper film obtained by spraying cathodes with a diameter of 20 mm and 40 mm on a glass substrate. The deposition was carried out at fixed values of the discharge current I_d = 100 mA in argon medium at a pressure in the discharge chamber 26 Pa for 30 minutes. The cathode – substrate distance has been varied within the limits of 10… 30 mm. The voltage at the discharge gap was 600… 800 V, respectively.

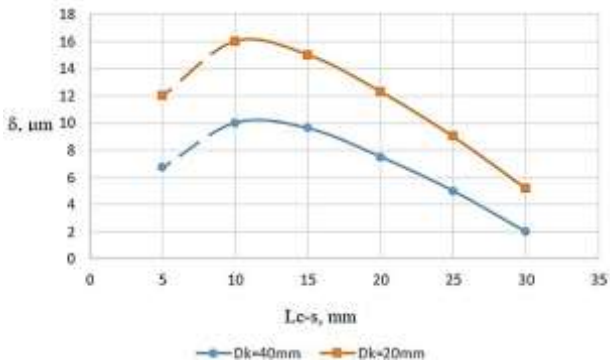


Fig. 3. Dependence of the thickness of the copper film layer δ on the cathode-substrate distance $L_{c\text{-}s}$ deposited on glass substrates

The experimentally obtained dependencies show that the thickness of the condensed layer increases as it approaches the outlet of the cathode cavity. Thus, reducing of $L_{c\text{-}s}$ from 30 mm to 10 mm in our experiments inevitable led to increasing of the thickness of the layer of copper film by 3..5 times with a marked deterioration of its homogeneity. The unevenness of the thickness of the films obtained at a distance of 30 mm doesn't exceed 5…8%, while for films obtained at a distance of 10 mm from the cathode such uniformity is maintained only at a distance of 10… 15 mm from the center of the substrate and at a distance of 20 mm reaches 30%.

Fig. 4 shows the graphs of the radial distribution of the thickness of the metal coating layer on a glass substrate with a size of 60 × 30 mm. Point 0 on the graph is the centre of origin of the film. Reducing of the cathode-substrate distance, obviously, leads to a certain increase in the temperature of the substrate, which is primarily due to the increasing of bombardment intensity of its surface by heavy atoms. In turn, substrate heating, causes an increase in the time of diffusive displacement of particles and migration processes on its surface, thereby contributing to the growth of the film layer thickness. However, in our experiments, further reduction of the $L_{c\text{-}s}$ distance to 5 mm entailed the significant slowdown in the growth of the coating layer. The thickness of such films is about 3… 4 μm less than the thickness of the films obtained at $L_{c\text{-}s}$ = 10 mm. This effect, in our opinion, can be associated with two main processes: mechanical separation of deposited metal atoms on the substrate's surface under bombardment by rapid gas ions, and their evaporation due to local heating by argon's ion flux (thermal atomization).

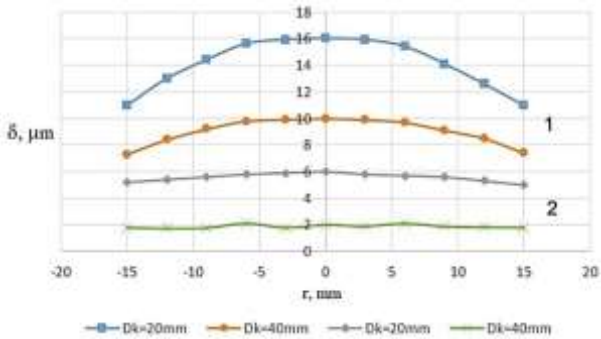


Fig. 4. Radial distribution of copper films thickness on a glass substrate deposited at a distance of: 1) 10 mm from the cathode cavity; 2) 30 mm from the cathode cavity

Experimentally obtained dependences (fig. 5) show that increasing of the discharge current leads to a rapid raising in the thickness of the metal coating condensed layer. Thus, going up of the I_d value from 25 mA to 100 mA, in our experiments, led to an increase in the thickness of the copper film within 0.5 ... 10 μm and 1 ... 16 μm for cathodes with a diameter of 40 mm and 20 mm, respectively.

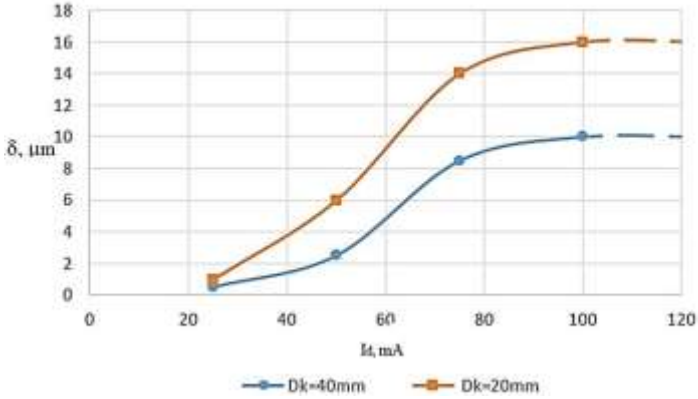


Fig. 5. Dependences of the copper films thickness δ on the magnitude of the discharge current I_d obtained at an argon pressure of 26 PA and a deposition time of 30 min

The greater thickness of the copper film obtained by sputtering of the cathode with a diameter of 20 mm is due to a more intense ionization and, accordingly, emission processes in the middle of the cavity than to a cathode with a diameter of 40 mm. This is due to the fact that at constant pressure in the discharge chamber, reducing the diameter of the cavity leads to a certain increasing in current density because of decreasing in the length of the dark cathode space d_k [7], [8]. Accordingly, the flow of ions increases, bombarding the surface of the target, thereby intensifying the

[7] Bolotov M.G., Bolotov G.P. "Criterial definition of the limits of glow discharge energy stability in welding". *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, UKRCON 2019 – July 2019. P. 497. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879992

[8] G.P. Bolotov, M.G. Bolotov I.V. Nahorna. "Hollow cathode glow discharge as a heating source in welding and brazing". *2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineearing*, UKRCON 2017. pp. 1197–1202. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100441

process of sputtering of its material. In the studied range of deposition mode parameters variation, the discharge current density varied within 5… 20 A/m^2 for a cathode with a diameter of 40 mm and 10… 40 A/m^2 for a cathode with an aperture of 20 mm.

Fig. 6 shows the dependence of the copper films thickness on the pressure of argon in the discharge chamber deposited at a current I_d = 100 mA for 30 minutes. The pressure in the discharge chamber varied within 26… 66 Pa, with the discharge voltage U_d = 600… 900 V. The distance of the cathode-substrate was 10 mm.

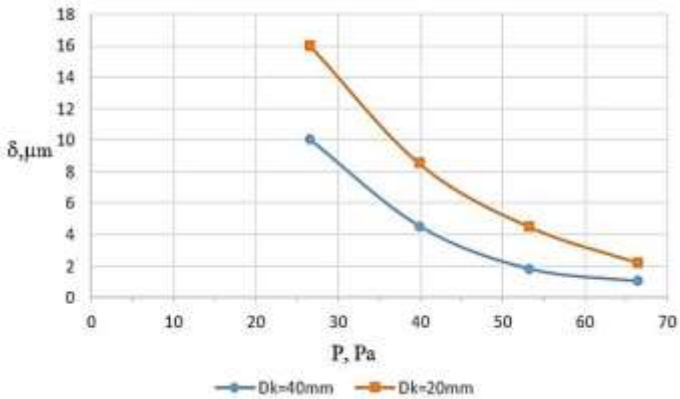


Fig. 6. Dependence of coating thickness δ on pressure in discharge chamber P at discharge current I_d = 100 mA, distance $L_{c\text{-}s}$ = 10 mm and deposition time 30 min

Changing of argon pressure in discharge chamber from 26 to 66 Pa leads to a rapid decrease in both the thickness of the film itself and the rate of its deposition on the glass substrate for both studied cathodes by 8 ... 10 times. This gives grounds to consider this parameter as the most important in the processes of thin film coating extensions. In this case, the decisive length of the free path of both the atomized target atoms and the working gas ions, whose value decreases with increasing pressure, is crucial. Since, in a result of increasing the collisions number with the residual gas molecules, they lose their energy and change the trajectory of their motion, which leads to a decrease in the coefficient of atomization of the material and to a decrease in the flux density of the deposited particles on the substrate surface accordingly. However, the

decrease in the gas gap pressure leads to increasing in the length of the dark cathode space that separates from the walls of the cavity compresses the cathode part of the plasma so that it begins to resemble an electron beam. This causes the decreasing of the condensation area on the substrate surface. The uniformity of such films in thickness does not exceed 15… 25% for cathodes 40 and 20 mm, respectively.

It should be noted that the deposition rate and the thickness of the coating layer also depend on the intensity of the bombardment and the target's material atomization by the positive ions of the working gas. The voltage at the electrode gap determines their energy, or rather by the magnitude of the cathode drop in U_c potentials[9]. This is due to the fact that almost all the discharge voltage is concentrated in its cathode part, since the anode potential drop and the discharge column in the sum do not exceed 15…20%.

In case of a GD with a hollow cathode, the determination of the magnitude of the cathode drop in U_c's potentials is due to some difficulties, which are due, first of all, to the cathode geometry. As in the hollow cathode conditions it doesn't possible to ensure the equidistant of all points of its surface from the anode. In this regard, the current density and the cathode potential drop across the cavity surface are not constant[10].

In[11], a technique that allows considering the ionization processes in the cathode layer of a glow discharge with a hollow cathode to determine the value of U_c with satisfactory agreement with the experiment is proposed.

The proposed expression combines the discharge voltage with the pressure in the discharge gap and looks as follows:

$$\frac{U_c}{U_0} = -\frac{p}{p_0}\ln(1-\frac{p}{p_0}), \qquad (4)$$

[9] Москалев Б.И. Разряд в полом катоде. Москва : Энергия. 1969, 181 с.

[10] Bolotov G.P., Bolotov M.G. "Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding", IEEE 37th International Conference "Electronics and Nanotechnology ELNANO'2017", pp. 365–369, April 2017. DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939780.

[11] Никулин С.П. «Тлеющий разряд с полым катодом в длинных трубках» ЖТФ. 1999. № 6 (69) с. 36–39.

where U_c is the cathode potential drop; U_0 – discharge burning voltage at pressure P; P – pressure in the chamber; P_0 is the critical pressure at which discharge burning becomes impossible.

$$p_0 = \frac{\kappa T S_a}{4\gamma V \sigma_i}, \tag{5}$$

where k – the Boltzmann constant; T – gas temperature; S_a – the area of the anode; γ – the ion-electron emission factor; V – the volume of the cavity; σ_i – the ionization cross section.

The discharge's burning voltage U_0 is determined by the equation:

$$U_0 = \frac{W}{e\gamma} + \frac{E_i}{e} \approx \frac{W}{e\gamma}, \tag{6}$$

where W – the average energy lost per ionization; E_i – the ionization threshold energy.

The calculations performed by this methodology has subsequently allowed us to determine the energy of the fast argon atoms with which they fall to the surface of the cathode and causing its atomization. The deposition rate was defined as the ratio of the thickness of the film to the duration of its production.

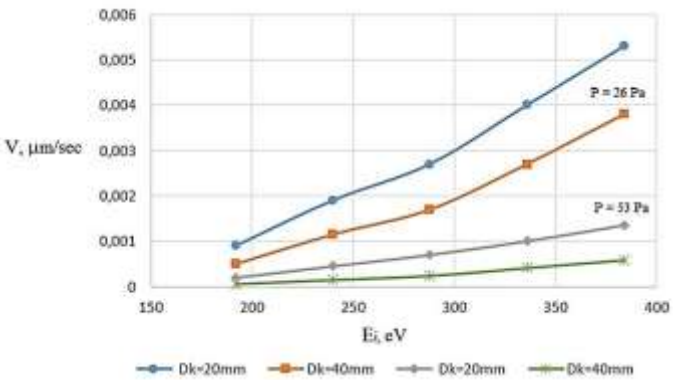
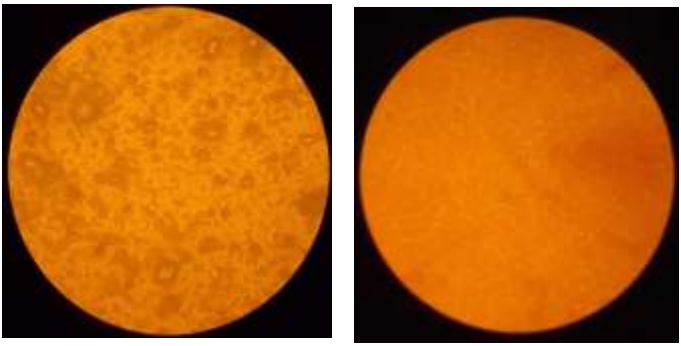


Fig. 7. Dependences of the deposition rate of copper films on a glass substrate on the ions energy which bombarding the cathode surface at argon pressures in a gas chamber of 26 Pa and 53 Pa

Fig. 7 shows the dependences of the rate of the copper films growth on the energy of argon ions obtained at pressures in a discharge chamber of 26 Pa and 53 Pa for 30 min for cathodes with a diameter of 20 mm and 40 mm. The discharge voltage varied from 400 to 800 V. Dependences show that with increasing of eU value from 192 eV to 384 eV, the deposition rate of metal coating increases almost linearly for cathodes of both diameters. The different slope of the curves also indicates a significant effect of argon pressure in the gas chamber on the film deposition rate.



a) b)

Fig. 8. Microstructure of Cu films deposited on a glass substrate at a energy of atoms of 192 eV for 30 min with the gas pressure of 53 Pa (a) and 26 Pa (b)

Fig. 8 shows the microstructure of Cu films deposited on a glass substrate at the energy of atoms of 192 eV for 30 min with the gas pressure of 53 Pa and 26 Pa.

The microstructure of a Cu film obtained at a gas pressure of 53 Pa characterizes by the less homogenious structure, rather than film which we've got at a pressure of 26 Pa. So then, at a pressure of 53 Pa the fast argon atoms form structural defects "islands" on the surface of the substrate, which are the condensation centers of the future film.

Also, was established that, increasing of the pressure in the discharge chamber from 26 Pa to 53 Pa leads to a significant slowdown of the film condensation process, which is caused by the partial loss of kinetic energy of both the atomized atoms of the target material and the fast argon ions due to their collisions.

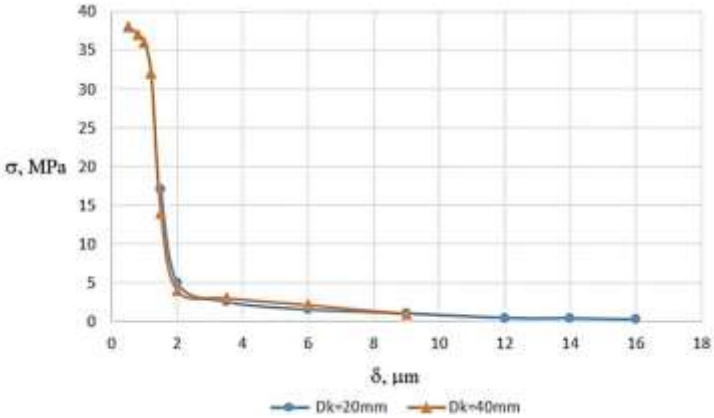


Fig. 9. Dependence of adhesion of copper coatings on their thickness

Fig. 9 shows the dependence of the adhesion of copper films on their thickness obtained at a deposition rate of 0.0053 μm/sec and a current density of 15 A/m^2 and 29 A/m^2 for cathodes with a diameter of 40 mm and 20 mm, respectively. From fig. 8 follows that in the range of thicknesses of 0.5… 1.2 μm obtained during deposition from a cathode with a diameter of 40 mm, the adhesive strength changes within the range of 38… 32 MPa. With further increase in thickness of the deposited films, their adhesion with the glass surface of the substrate deteriorates dramatically. Thus, in the thickness range of 1.5… 9 μm, for both cathode diameters, the adhesion strength decreases from ~ 17 MPa to 1 MPa, and at δ = 12… 16 μm the adhesion strength drops to almost zero and is approximately 0.41… 0. 24 MPa. Such dependence, in our opinion, is explained by the increase of internal stresses in the body of the coating with rising of film thickness.

3. Optimization of thin metal films deposition process in hollow cathode glow discharge

As mentioned earlier, the formation and growth of metal films in a plasma of glow discharge is multifactorial, ie, defined coherence of a number of parameters, which greatly complicates the control of deposition process. In this regard, the ways of optimizing the conditions of technological process of deposition of thin-film in glow discharge with the hollow cathode effect were considered.

The definition of these parameters in the traditional way in this case is complicated, so their choice was performed by the “swing” method, when the change in the desired parameter was fixed while deviating one of the technological parameter from some average value by 25% in the direction of increasing and decreasing of it[12].

The model was introduced into the set of parameters, taking into account the possibility of determining their quantitative assessment. As the parameter of optimization the thickness of the copper film (δ, μm) deposited on a glass substrate was determined. As the variable factors the cathode-substrate distance $L_{c\text{-}s}$ (X1), discharge current I_d (X2), the magnitude of the pressure in the discharge chamber P (X3) and the deposition time t (X4) were taken.

To minimize the effects of random measurement errors, each experiment attempt was repeated 5 times. The intervals of variation of factors and their numerical values at the upper and lower levels are shown in the table. 1.

Table 1

Levels and intervals of factors variation

Factors	**Variation intervals, ΔX**	**The levels of variation**		
		The lower level, (X_1=–1)	**Basic level**	**The upper level, (X_1=+1)**
The cathode-substrate distance ($L_{c\text{-}s}$), mm	10	10	20	30
Discharge current I_d, mA	25	50	75	100
Pressure in the discharge chamber P, Pa	20	20	40	60
Deposition time t, sec	20	20	40	60
The optimization parameter is the thickness of the copper film δ, μm				

In order to determine the influence of the varying factors on the value of the optimization parameter, a full factor experiment, the matrix of which has the form 2^4 was used.

The linear model of this experiment looks like this:

$$y_1= b_0+b_1\cdot x_1+b_2\cdot x_2+b_3\cdot x_3+b_4\cdot x_4; \quad (7)$$

[12] Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Москва : МИСИС, 1972. 105 с.

The calculation of the coefficients for the corresponding factors was carried out according to the next equation [13]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_{ji} y_i}{N}, j = 0,1,.....k \quad (8)$$

where $\sum_{i=1}^{N} x_{ji}$ – the algebraic sum of the elements vector – the column of each factor; i – the experiment number; j – factor number; N – the number of experiments.

The coefficient b_0 was found as the arithmetic mean of the optimization parameter, b_0 = 5,987, with b_1 = -1,125; b_2 = 2.913; b_3 = –1.375; b_4 = 2.475.

It is known that the magnitude of the coefficient at the corresponding factor determines its contribution to the value of the optimization parameter, ie, the greater the numerical value of the coefficient, the stronger the factor will affect the optimization parameter. In this regard, it can be concluded that the discharge current and deposition time are the most positively influential parameters, as the optimization parameter (thickness of the deposited layer) increases with their numerical value. Most negatively, among the studied parameters, the process of deposition of the coating in the glow discharge with a hollow cathode is influenced by the increase in the distance of the cathode substrate and the pressure in the discharge chamber, which is evidenced by the minus sign at the corresponding coefficients.

The calculation of the optimization parameters y1 performed by equation 1 showed a significant discrepancy with respect to the experimental data (Table 2).

[13] Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский ; Под ред. Ю.П. Адлер. Москва : Наука, 1976. 278 с.

Table 2

The results of the experiments

№ Exp.	Level of factors				Experimental value of optimization parameter y, μm	Estimated value of the optimization parameter y_1, μm	The value of the optimization parameter based on pair interactions y_2, μm	The value of the optimization parameter based on triple interactions y_3, μm
	X_1, mm	X_2, mA	X_3, Pa	X_4, sec				
1	10	50	20	60	6	8,05	6,3	5,9
2	30	50	20	20	2,5	0,85	2,5	2,5
3	10	100	20	20	9	8,9	8,74	8,9
4	30	100	60	60	10	9	10,54	10,13
5	10	50	20	20	4	3,1	3,712	4,1
6	30	50	60	20	1	-1,9	0,99	1,12
7	10	100	60	20	3,5	6,2	3,8	3,6
8	10	100	20	60	16	13,9	16,3	16,13
9	30	100	20	20	4,5	6,7	5,04	4,6
10	10	50	60	60	5	5,3	4,7	5,1
11	10	50	60	20	1,4	0,35	1,7	1,3
12	30	100	60	20	2,2	3,93	1,7	2,1
13	30	50	20	60	2,9	5,8	3,6	2,9
14	30	100	20	60	14	11,63	13,5	13,9
15	30	50	60	60	1,8	3,05	1,8	1,8
16	10	100	60	60	12	11,13	11,74	11,26

This means that the analyzed process is a complicated system that cannot be described by a linear model. Therefore, for the sake of purity of calculations, it is necessary to consider not only linear terms b1x1 but also triple interactions of factors.

Thus, given the pairwise interactions of the factors, the regression model will look like this:

$$y_2=b_0+b_1\cdot x_1+b_2\cdot x_2+b_3\cdot x_3+b_4\cdot x_4\cdot b_{12}\cdot x_{12}+b_{13}\cdot x_{13}+ \\ +b_{14}\cdot x_{14}+b_{23}\cdot x_{23}+b_{24}\cdot x_{24}+b_{34}\cdot x_{34} \quad (14)$$

The regression equation with the effect of triple factor interactions:

$$y_3=b_0+b_1\cdot x_1+b_2\cdot x_2+b_3\cdot x_3+b_4\cdot x_4\cdot b_{12}\cdot x_{12}+b_{13}\cdot x_{13}+b_{14}\cdot x_{14}+b_{23}\cdot x_{23}+ +b_{24}\cdot x_{24}+b_{34}\cdot x_{34}+b_{123}\cdot x_{123}+b_{124}\cdot x_{124}+b_{234}\cdot x_{234}+b_{134}\cdot x_{134;} \quad (15)$$

The triple coefficients of the equation have the following values: b_{123} = 0,137; b_{124} = 0.387; b_{134} = -0.275; b_{234} = – 0.138.

The results of the calculation of the regression equations, taking into account the effect of paired and triple interactions (y2, y3) of the studied factors are given in Table 3 indicates that the model has a sufficiently high accuracy with regard to triple bonds, as evidenced by the considerable similarity between the experimental results.

Regression and correlation analysis were performed to determine the relationship between the independent variables and the optimization parameter (copper film thickness).

One of the main indicators that determine when conducting correlation analysis is the value of the Pearson multiple correlation coefficient (r), the calculation of which was carried out according to the following equation [14]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})\cdot(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2 \cdot (y_i - \bar{y})^2}}; \quad (16)$$

where $(x_i - \bar{x})^2$ and $(y_i - \bar{y})^2$ – the square of the difference of the arithmetic mean of x and y.

Hence r = 0.916, indicating a statistically strong relationship between the varied parameters.

The second major parameter of the correlation analysis that determines the relationship between the varied factors and the optimization parameter is the multiple determination coefficient (r2), r2 = 0.84, i.e. the variance of the dependent variable is 84%. Thus, we can say that this set of independent variables (variable parameters) 84% affects the optimization parameter, the remaining 16% of the variation is

[14] Растригин Л.А. Статистические методы поиска. Москва : Наука, 1968.

provided by the influence of other parameters not taken into account in the model. This is a high result.

The conducted regression analysis is presented in form of a graph in fig. 10.

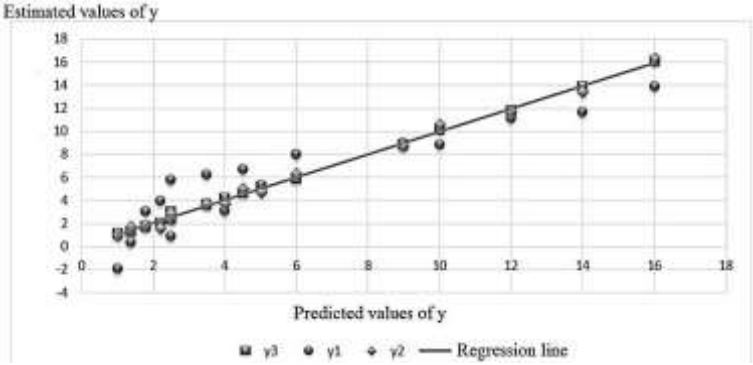


Fig. 10 The diagram of scattering of optimization parameter values

The significance of each of the equation's coefficients was checked independently using the Student's t-test and constructing a confidence interval. Firstly, it is necessary to find the variance of the regression coefficient, which is calculated by the equation[15]:

$$S_{bj}^{\ 2} = \frac{S_{вiд}^{\ 2}}{N}; \tag{17}$$

where $S_{rep}^{\ 2}$ – the variance of reproducibility; N is the number of experiments.

Take into account the number of experiments conducted simultaneously, the reproducibility variance is defined as:

$$S_{вiд}^{\ 2} = \frac{\sum_{u=1}^{NN}(y_u^0 - \bar{y}^0)}{NN-1}; \tag{18}$$

[15] Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. Москва : Металлургия, 1966.

where y_u^0 – the arithmetic value of optimization parameter; $\bar{y}^0$ – the arithmetic value of optimization parameter obtained in parallel experiments; NN – the number of parallel experiments. In this regard, in our case NN-1 = 4.

The calculated value of the Student's t-test is determined by the next equation:

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{bj}}; \tag{19}$$

where $|b_j|$ the absolute value of the coefficient.

The calculations made by the eq. (19) are presented in the form of table 3. Comparison of the results of the calculation with the table value of the Student's t-test shown that for our number of degrees of freedom equal to t = 1,795 it can be said that the coefficients b_2, b_3, b_4 are significant in the range of confidence 0,9. The coefficient b_1 can be neglected. Building a confidence interval confirmed the previously obtained results. The absolute value of the first criterion b_1 is less than the upper bound of the confidence interval, indicating that it is not significant.

Table 3

Summary table of results

The values of the coefficients	**t-statistics, t = 1,795 for a 0.9 confidence**	**Confidence interval**		**Coefficient multiple correlations, r**	**Determination factor, r^2**
		The lower boundary bj-Δbj	**The upper boundary bj+Δbj**		
b_0=5,987	-	-	-	0,916	0,84
b_1=-1,125	1,712	-0,608	-1,642		
b_2=2,913	4,431	1,347	2,742		
b_3=-1,375	2,092	-0,832	-1,286		
b_4=2,475	3,766	1,144	2,265		

CONCLUSIONS

Thus, the principal possibility of obtaining thin-film glass coatings deposited in the plasma of a glow discharge initiated in a hollow cathode at argon pressures in a gas chamber 26…53 Pa is shown.

It was found that at a Cu film thickness of 0.5… 1.2 μm obtained under these conditions, the adhesive strength fluctuates within 38…32 MPa and decreases rapidly with the subsequent film expansion.

By means of using the statistical methods, it was found that among all the technological parameters, the most significant influence on the processes of formation and growth of thin-film metal coating is the discharge current I_d and the deposition duration t. It was found that the distance of the cathode-substrate $L_{c\text{-}s}$ and the pressure in the discharge chamber P lead to a significant decrease in the thickness of the deposited film.

It is established that the constructed regression mathematical model allows to obtain the results of theoretical calculation with 4...6% error relative to experimental ones.

Conducted correlation and regression analyzes showed that the obtained model is statistically significant within the confidence limits of 0.9. The value of the multiple correlation coefficient is at 0.916, which indicates a close relationship between the input parameters and the optimization parameter.

The analysis found that the optimization parameter (copper film thickness) of 84% is described by the influence of the set of investigated mode parameters, the remaining 16% of the variation is provided by the influence of other parameters not taken into account in the model.

SUMMARY

The work considers the application of low temperature plasma of hollow cathode glow discharge for a thin metal films obtaining on a glass substrates at a gas pressures of 1 to 100 Pa. The substrate – cathode distance varied in a range of 5...30 mm. The discharge current I_d = 25… 100 mA, with the voltage on the electrodes fluctuating within 400… 800 V. It is shown that at a Cu film thickness of 0.5… 1.2 μm obtained under the given conditions, the adhesive strength fluctuates within 38…32 MPa and decreases rapidly with further film expansion. Also, by using of mathematical modeling with statistical methods showed the feasibility of controlling the process of thin films deposition in plasma of glow discharge by two main technological parameters,

namely the strength of the discharge current and the duration of deposition.

It is established that the constructed regression mathematical model allows to obtain the results of theoretical calculation with 4...6% error relative to experimental ones.

REFERENCES

1. Plasma assisted physical vapor deposition processes: A review / R.F. Bunshah, C.V. Deshpandey. *J. Vac. Sci. and Technol.* A3 (3). 1985. p. 553–560.
2. Болбуков В.П. Распыление мишени на дне полого катода источника быстрых молекул газа в неоднородном магнитном поле. *Вестник МГТУ «СТАНКИН».* 2014. № 2. С. 111–117.
3. Метель А.С., Григорьев С.Н. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов: физика, техника, применения. Москва : ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К». 2005. 296 С.
4. Bolotov G.P., Bolotov M.G., Prybytko I.O., Kharchenko G.K. “Diagnosis of plasma glow discharge energy parameters in the processes of treatment small diameter long tubes”, in II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), Kharkiv., IEEE. 2016, pp. 116–119. **DOI:** 10.1109/YSF.2016.7753815
5. CVD-processes by hollow cathode glow discharge / A. Hellmich, T. Jung, A. Kielhorn, M Ribland. *Surf. Coat. Technol.*, 1998, V. 98, p. 1541–1546.
6. Физика тонких металлических и полупроводниковых слоев. *Успехи физических наук.* Т. LII. Вып. 4, 1954, с. 561–602.
7. Bolotov, M.G., Bolotov, G.P. “Criterial definition of the limits of glow discharge energy stability in welding”. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019. July 2019, P. 497. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879992.
8. Bolotov G.P., Bolotov M.G., Nahorna I.V. “Hollow cathode glow discharge as a heating source in welding and brazing”. 2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineearing, UKRCON 2017. pp. 1197–1202. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100441.
9. Москалев Б.И. Разряд в полом катоде. Москва : Энергия. 1969, 181 с.
10. G.P. Bolotov, M.G. Bolotov, “Determination of external stabilizing resistor value in the glow discharge power supply while welding”, IEEE 37th International Conference “Electronics and

Nanotechnology ELNANO'2017", pp.365-369, April 2017. DOI: 10.1109/ELNANO.2017.7939780.

11. Никулин С.П. Тлеющий разряд с полым катодом в длинных трубках. *ЖТФ.* 1999. № 6 (69) с. 36–39.

12. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Москва : МИСИС, 1972. 105 с.

13. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. Под ред. Ю.П. Адлер. Москва: Наука, 1976. 278с.

14. Растригин Л.А. Статистические методы поиска. Москва : Наука, 1968.

15. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. Москва : Металлургия, 1966.

Information about author:
Bolotov M. G.,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Chernihiv National University of Technology
95, Shevchenko Str., Chernihiv, 14035, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.2

A MODERN TECHNOLOGY OF TEACHING AND TESTING MICROCONTROLLER SYSTEM DESIGNERS

Bondarenko V. E.

INTRODUCTION

Microcontrollers (MC) are computers executed on one microchip. They are used in many spheres of human activity. Microcontrollers are intended for management of various electronic devices. The interaction between units of a micro-controller is made according to a program. Such a program is incorporated in the microcontroller. Unlike microprocessors of personal computers, microcontrollers contain built-in additional devices. These devices carry out tasks under the control of the microprocessor nucleus of the microcontroller.

An increased demand for microcontroller systems requires training of design systems experts. This problem was discussed in[1] which described the training platform of the PIC (Programmable Interface Controller) microcontroller, made by the Microchip Technology Incorporation. Hedle[2] discusses a course in microcontroller system design which can help students to improve learning results.

It helps students to develop knowledge and technical skills in microcontroller system design. Hardware was developed for the laboratory using the Motorola 68HC11 microcontroller. The group of authors[3] share their experience of teaching microcontroller system design with the help of the SK40C PIC starter kit. General problems of

[1] Hsiung S., Ritz J., Jones R., Eiland J. Design and Evaluation of a Microcontroller Training System for Hands-on Distance and Campus-Based Classes. Journal of Industrial Technology. 2010, v. 26, № 4, p. 1–10.

[2] Hedley M., Barrie S. An Undergraduate Microcontroller Systems Laboratory. IEEE Transactions on Education , 1998, v. 41, № 4, p. 17–25.

[3] Che Fai Yeong, Hisyam A. R., Su E., Lee Ming A Hands-on Approach To Teaching Microcontroller. *Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2013, v. 11, № 1, p. 55–59.

technology of satellite and mobile communication in modern distance education are discussed in[4,5].

Analysis shows that existing works only partially address the microcontroller system design problem.

Therefore, this article features a technology of teaching microcontroller system designers. This technology is based on a Web-site, which is used for receiving theoretical knowledge. It uses a simulator which can help to project variants of a system and its software.

The technology uses the hardware (Arduino Uno), which allows students to construct real microcontroller systems. The final stage of design is development of a project printed-circuit board.

This technology can improve education quality**,** thanks to more effective reflecting of all sides of microcontroller system design.

In view of the aforesaid, this paper describes a technology of teaching microcontroller system design. This educational technology can be applied to all forms of training. However, it is particularly helpful for part-time and distance forms of learning. Such students do not have stable contact with teachers. As usual, they are located at large distances from an educational institution. However, the stable contacts of students with the tutors determine the quality of education.

This paper is organized as follows:

Section 1 is an introduction outlining the problem of teaching microcontroller systems designers. Section 2 describes the structure of a training complex, which consists of several subsystems that guarantee quality of the students' training as microcontroller system designers. Section 3 contains the main results of the paper. It describes the technology of expert teaching of micro-controller system design. Section 4 describes in detail seven projects which allow students to receive practical skills in microcontroller system designing. Section 5 presents the conclusion and the main results of the paper.

1. The structure of training complex

This technology is based on the use of a training complex. It allows students to study the discipline "Designing of microcontroller systems"

---

[4] Bondarenko V.E. Technology of Satellite and Mobile Communication in Modern Distance Education. *Second International Conference Modern* (e -) Learning, July, 2007, Bulgaria. Proceedings, ITHEA, Sofia, 2007, c. 120–127.

[5] Bondarenko V.E. Mobile Communication Technology as a Tool of Educational Process. *Information Technology and Knowledge*, 2007, v.1, № 1, p. 78–80.

in stationary and remote modes. This is useful especially for the students of distance courses. The general structure of the training complex is shown in Figure 1.

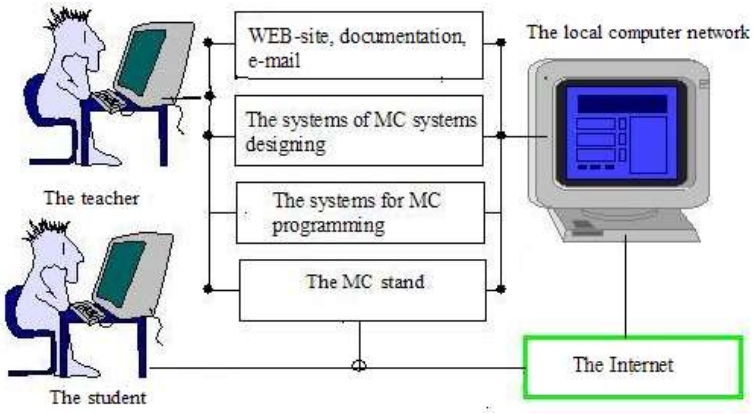


Figure 1. General structure of the training complex

As it is shown in Figure 1, the training complex consists of several subsystems. Each of the subsystems forms a certain technological stage.

1. The first stage allows students to see Web-site with theoretical papers. They can find the literature about the designing of microcontroller systems. They can receive a tutor's consultations by email and Skype. Finally, students receive tasks for designing.

2. The second stage is projection of the circuit of the received task. Such projection is made with the help of the core ISIS of the Suit Proteus Professional Version 8.6 (the firm Labcenter Electronics). The example of such projection is shown in Figure 2.

3. The third stage is necessary for designing the software which provides the correct work of the projected system. All software is written in the programming language C. This software is projected with the help of the integrated development environment CodeVisionAVR Version 3.12 (the firm HP Info Tech). A result of such projection is the program which can be written in the microcontroller memory of the circuit that was projected at stage 2.

4. The fourth stage is the simulation stage. It is based on stages 2 and 3. A student can simulate on the computer the functioning of the

projected microcontroller system. They can estimate the quality of the project in different modes.

5. The fifth stage allows students to realize the project on the stand (Arduino Uno) with the real equipment, where students can investigate the quality of the project functioning.

6. The sixth stage gives possibility to make a printed board for the projected system. Such a printed board is projected with the help of the core ARES of the Suit Proteus Professional Version 8.6.

2. The technology of the work with the training complex

First, students study the theoretical material about the AVR-microcontrollers. Such documentation is placed on the system web-site.

Further, students receive the tasks of growing complexity. The tasks will allow students to receive professional skills in microcontroller systems designing. These tasks are formulated in seven laboratory works. The laboratory works allow students to comprehend most aspects of the microcontroller system design. The student receives a task for designing (stage 1).

They develop the basic scheme of the projected device, using the core ISIS of the Suit Proteus Professional Version 8.6 (the firm Labcenter Electronics) (stage 2).

The proposed alarm system can be used for a bike or scooter. It is assembled on the AVR ATmega8 microcontroller. An example of such a scheme of a sound alarm system, which was worked out on the basis of the microcontroller ATMega8, is presented in Figure 2.

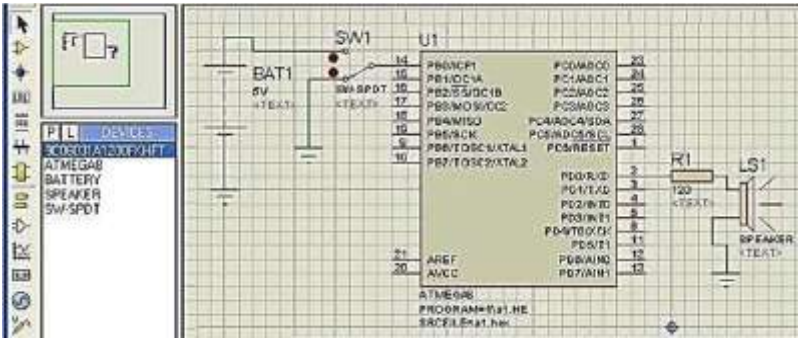


Figure 2. The scheme of the alarm system

Next, the student develops the program for the microcontroller (stage 3). The program is made with the help of the integrated environment CodeVisionAVR Version 3.12 (the firm HP Info Tech). This program ensures the solution of necessary tasks in the projected microcontroller system.

The program of the speaker sound has the following form. The smaller delay in the ***delay_ms*** function, the higher the sound frequency. This program is written in C language.

```
#include <mega8.h>
#include <delay.h>
void main(void)
{ DDRD=0xFF;
while (1)
{  if(PINB.0)  // The SW1switch check
{PORTD=0b11111111;
delay_ms(1);  //Sound frequency control
PORTD=0b00000000;
delay_ms(1);  //Sound frequency control
}}
```

The program is connected to the microcontroller project in the core ISIS of the Suit Proteus Professional, and the modelling of the projected system is carried out (stage 4). If the functioning of the model does not correspond to the technical requirements, the student comes back to the design of the basic scheme (stage 2), or to the development of the program and carries out necessary updating (stage 3). If a student feels the necessity to receive additional theoretical knowledge, they go back to stage 1. This process is repeated until the project model meets the technical requirements.

Further, the projected system is realized on the stand (Arduino Uno) with the real equipment (stage 5)**,** to investigate the quality of its functioning. Such realization will be shown in the next section. If the project does not work according to the requirements, it is carried out the transition to the above described design stages (stages 1–4). Where it is carried out: 1) reading of theoretical papers, 2) the updating of the scheme, 3) the input of the changes in the program, 4) modelling of the new variant of the project, 4) realizing of a new variant of the project on the stand.

When the project works adequately to the requirements, it is carried out the designing of a printed-circuit board for projected system (the

stage 6). Such a printed-circuit board is projected with the help of the core ARES of the Suit Proteus Professional Version 8.6. The core ARES uses a scheme of a system which was projected with the help of the core ISIS (the stage 2).

3. Development of laboratory works based on the platform Arduino Uno

3.1. Objectives for the practical works

The stand for seven laboratory works uses the following equipment:

the Arduino Uno, a breadboard, a sensor module hydrocarbon gases and smoke (MQ-2), a sensor temperature and humidity (DHT-11), the LCD 16×2 with the I2C module, a module real-time clock (DS3231), an infrared receiver, a remote controller, a buzzer (speaker), LEDs, resistors, connecting wires.

All necessary equipment is shown in Figure 3.

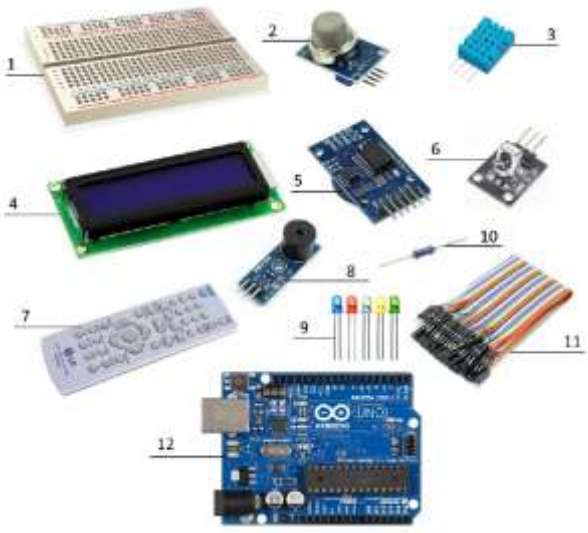


Figure 3. Equipment, which is needed for laboratory works: a breadboard (1), a gas sensor MQ-2 (2), a temperature and humidity sensor DHT-11 (3), an LCD module (4), a real-time clock (5), an infrared receiver (6), a remote controller (7), a buzzer (8), LEDs(9), resistors (10), connecting wires (11), the Arduino Uno (12)

3.2. Laboratory work 1

This work has several goals: 1) Familiarization with the board Arduino Uno. 2) The installation of the necessary software. 3) Design of the first project which includes a circuit with the LEDs and C-program. This program allows the blinking of the LEDs.

The equipment of this work is: the Arduino Uno board, resistors, LEDs, connecting wires.

To get started with the Arduino Uno board, students download and install the software Integrated Development Environment (IDE). The software is on the official website http://www.arduino.cc/en/Main/Software.

We install the IDE**,** and it is launched. Further**,** we choose the Arduino Uno board (Figure 4) and the COM3 port (Fig. 4.3), to which it connects.

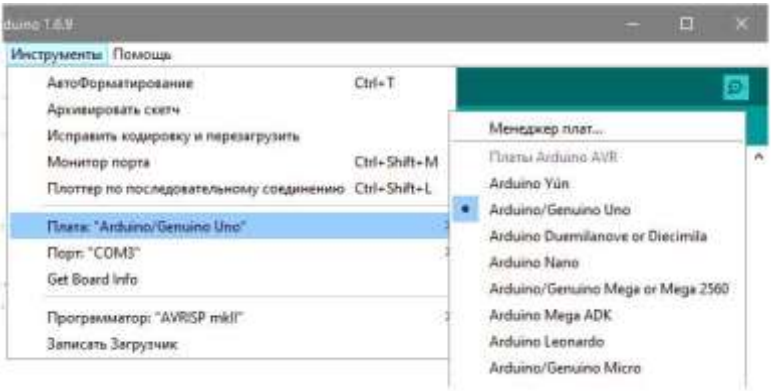


Figure 4. The choice of the working board Arduino Uno in the IDE

The essence of the first laboratory work is to connect three LEDs and to write a sketch (C-program) that will light the LEDs alternately at intervals of five seconds.

You can keep in mind that LEDs have two contacts («+» and «-»).

A resistor needs to be set between the LED and the voltage source to prevent combustion of the LED.

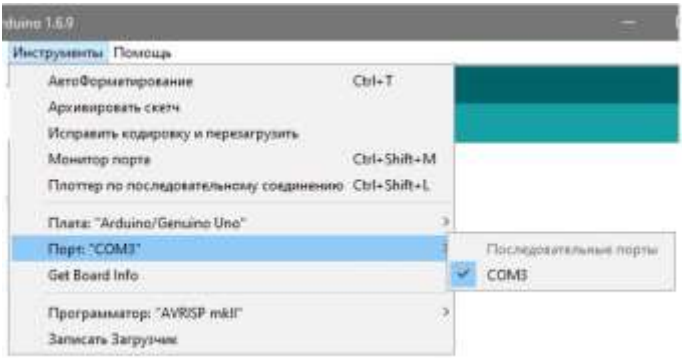


Figure 5. The choice of the working port (COM3) of the Arduino Uno in the IDE

The contact «+» will be connected with the information port of the Arduino Uno which has voltages from 0 to + 5V through a resistor to control the power supply of the LED. The contacts «-» of the LEDs should be connected with the common rail «-». Connect in such manner: the green LED to the port nine, yellow LED to the port 10 and red LED to the port 11.

Assemble the circuit as shown in Figure 6.

In order to light the LED**,** it is sufficient to apply the voltage (+5V) to the port to which this LED is connected. For this we should determine the port position (*OUTPUT*) for information transfer with the help of function "***pinMode (port_number, OUTPUT)***" and then submit to this port the voltage (+5 V) with the help of the function "***digitalWrite (port_number, HIGH)***".

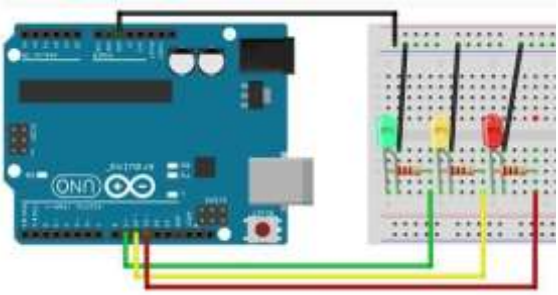


Figure 6. The circuit of laboratory work 1

The LED can be switched off with the help of the function "***digitalWrite (port_number, LOW)***".

Now we write the sketch (C program) and upload it to the project.

```
void setup () {
Serial.begin (115200)
// Set the speed of information exchange with Arduino
pinMode (9, OUTPUT);
// Set the port 9 to position of information transfer
pinMode (10, OUTPUT);
// Set the port 10 to the position of information transfer
pinMode (11, OUTPUT);
// Set the port 11 to the position of information transfer
}
void loop () {
digitalWrite (11, LOW); // The red LED turns off
digitalWrite (9, HIGH); // The greenLED lights
delay (5000); // delay 5 seconds

digitalWrite (9, LOW); // The green LED turns off
digitalWrite (10, HIGH); // The yellow LED lights
delay (5000); // delay 5 seconds
digitalWrite (10, LOW); // The yellow LED turns off
digitalWrite (11, HIGH); // The red LED lights
delay (5000); // delay 5 seconds
}
```

After downloading this sketch and the system activation, the LEDs will alternatively glow. First, the green LED lights up (Figure 7), the yellow LED will glow after five seconds, then the red LED will glow after next five seconds.

The objective of this work is to learn how to work with the sensor DHT-11, to implement data reading of the current temperature and humidity, to bring this information to the monitor of the serial port.

The equipment of this work consists of the equipment of the previous laboratory work, a temperature and humidity sensor DHT-11, resistors and connecting cables.

The work with additional modules and sensors demands libraries. We need a library for work with the temperature / humidity sensor which is used the laboratory work. This library can be found on various websites and forums.

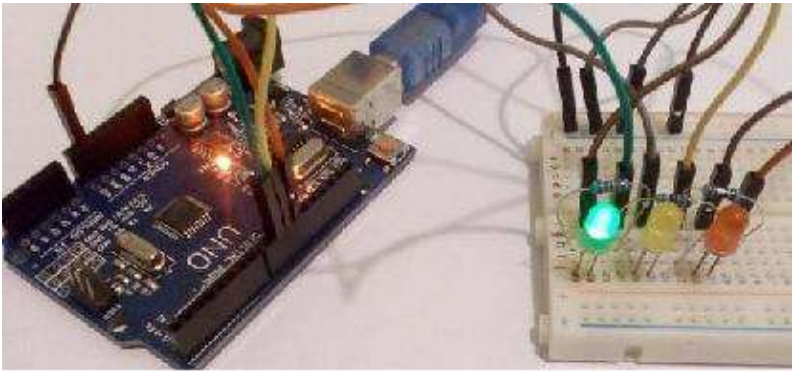


Figure 7. The demonstration of the green LED glows

3.3. Laboratory work 2

We should add the library to our IDE after loading the library.

The attaching **of** the library to the sketch is made with the line: ***#include <stDHT.h>***.

Now we connect the sensor. It has four contacts, but we will use only the first, second and fourth. The first contact is connected to the bus voltage (+ 5V). Contact two is an informational contact. It is connected directly to the second port of the board Arduino Uno. The fourth contact is connected to the voltage bus (- ground connection).

To prevent deterioration of the sensor, between the + 5V voltage contact on the sensor output and information output**,** you need to install the resistor.

The LEDs that were used in the previous laboratory work will signal the surrounding temperature. The green LED lights up if the temperature is below 20 degrees. The yellow LED will switch on if the temperature is between 20 and 30 degrees. And the red LED will switch on if the temperature is above 30 degrees.

The current temperature can be obtained by using the function "***sens.readTemperature (port_number)***". The humidity can be found with the help of the function "***sens.readHumidity (port_number)***".

Assemble the circuit as shown in Figure 8.

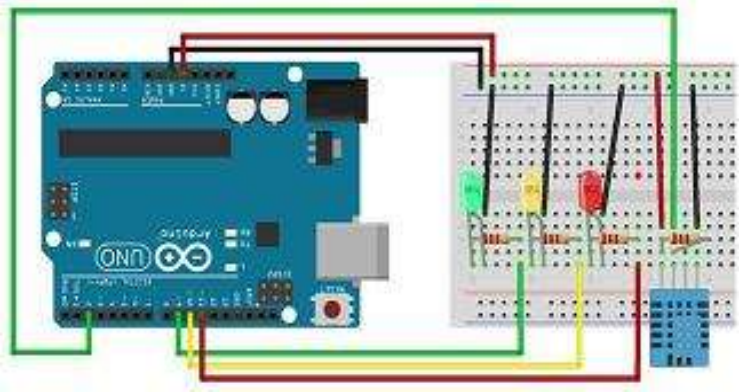


Figure 8. The circuit of laboratory work 2

We turn to the writing of the sketch:

```
#include <stDHT.h> // The library uses with the probe DHT-11
DHTsens (DHT11); // Specify the type of temperature sensor
void setup () {
Serial.begin (115200)
// Set the speed of information exchange with Arduino
pinMode (2, INPUT);
// Set the port 2 receiving position information
pinMode (9, OUTPUT);
// Set the port 9 to position information transfer
pinMode (10, OUTPUT);
// Set the port 10 to the position information transfer
pinMode (11, OUTPUT);
// Set the port 11 to the position information transfer
digitalWrite (2, HIGH);
// Serve a voltage on the port 2
}
void loop () {
int t = sens.readTemperature (2) - 2;
// The variable to store the current temperature
int h = sens.readHumidity (2);
// The variable to store the current humidity
// The green LED lights if the current temperature is below of 20 degrees
```

```
if (t <20) {
digitalWrite (9, HIGH);
}
else {
digitalWrite (9, LOW);
}

// The yellow LED lights if the current temperature is from 20 to 30 degrees
if (t> = 20 && t <30) {
digitalWrite (10, HIGH);
}
else {
digitalWrite (10, LOW);
}
The red LED lights if the current temperature is above 30 degrees
if (t> = 30) {
digitalWrite (11, HIGH);
}
else {
digitalWrite (11, LOW);
}
// The output information collected on the Serial Port Monitor
Serial.print( "HUM:");
Serial.print (h); // Output humidity
Serial.print( "%");
Serial.print( "TEMP:");
Serial.print (t); // Output Temperature
Serial.print( "C");
Serial.print( "\ n");
}
```

We download the sketch and observe data of humidity and temperature on the monitor (Fig. 9).

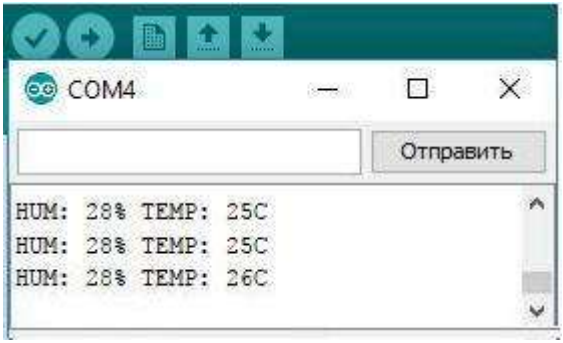


Figure 9. The monitor of the serial port

3.4. Laboratory work 3

The objective of this work is the connection of the LCD, to show information collected by sensor DHT-11.

This work needs the following equipment: equipment of the previous laboratory work, an LCD size 16×2 with the I2C module, connecting wires.

ATmega microcontrollers support the I2C interface. The SDA data line on the board Arduino is connected to analog port 4**,** and the clocking SCL line is connected to analog port 5. The Arduino has the regular library ***"Wire"*** for the work with the I2C protocol.

The I2C module allows us to control devices that require an 8-bit bus with the help of just two contacts using the protocol I2C. Thanks to this module, the quantity of ports which are needed to connect the LCD to Arduino **is** reduced from 16 to 4.

We should download and connect the library ***"LiquidCrystal_I2C"*** to interact with the LCD via the I2C module.

The sketch must define the LCD address and its dimension. This is done by using the function "***LiquidCrystal_I2C lcd (0x3F, 16,2)***", where 0h3F is the display address and 16,2 is the LCD size. After this, the display is initialized by the function "***lcd.init ()***" and turn**s** on the lights using function "***lcd.backlight ()***".

We should put the cursor of the display to the necessary position using the function "***lcd.setCursor (position in row, position in column)***" before the information output. Output symbols are written on display with the help of function "***lcd.print ()***".

Typically, such displays have a limited number of characters available for output. We can do new characters with the help of an array of the type “byte” and the function “***lcd.createChar ()***”.This array will meet the desired pixels on the display (1 in needed bits).

We can write the Celsius degree symbol (°) as such array *degree* in the sketch:

```
bytedegree [8] =
{ 0b011 00,
0b10010,
0b10010,
0b01100,
0b00000,
0b00000,
0b00000,
0b00000
};
```

General connection diagram is shown in Figure 10.

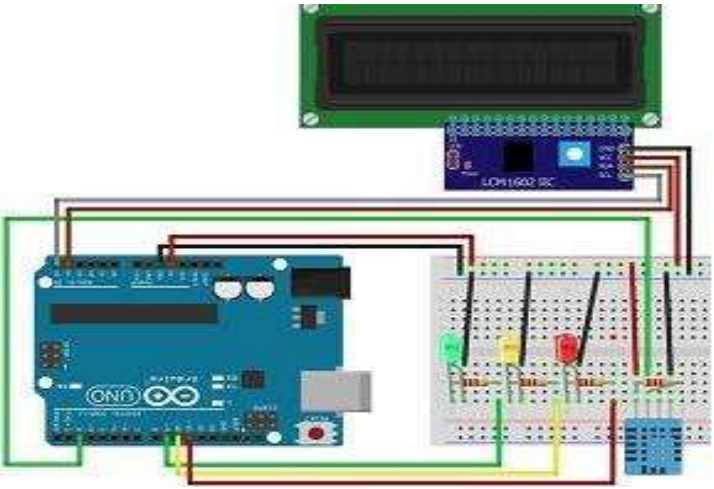


Figure 10. The circuit of laboratory work 3

The sketch is shown below.

```
#include <stDHT.h>
// The library for using with temperature and humidity sensor
```

```
DHT sensor (DHT11);
// Specification of the type of temperature sensor
#include <Wire.h>
// The library for work with I2C module
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
// The library for work with display
LiquidCrystal_I2Clcd (0x3F, 16,2);
// Specification of the address and the size of the display
bytedegree [8] =
{
0b01100,
0b10010,
0b10010,
0b01100,
0b00000,
0b00000,
0b00000,
0b00000
};
void setup () {
Serial.begin (115200)
// Setting the speed of information exchange with Arduino
pinMode (2, INPUT);
// Settingof the port 2 for receiving information
pinMode (9, OUTPUT);
// Setting the port 9 for information transfer
pinMode (10, OUTPUT);
// Setting the port 10 for information transfer
pinMode (11, OUTPUT);
// Setting the port 11 for information transfer
digitalWrite (2, HIGH);
// Serve voltage on port 2
lcd.init ();
// Initialize display
lcd.backlight ();
// Enables backlight display
}
void loop () {
int t = sens.readTemperature (2) - 2;
// variable to store the current temperature
```

```
int h = sens.readHumidity (2);
// The variable for storing the current humidity
// The green LED lights if the current temperature is below 20 degrees
if (t <20) {
digitalWrite (9, HIGH);
}
else {
digitalWrite (9, LOW);
}
// The yellow LED lights if the current temperature is 20 to 30 degrees
if (t> = 20 && t <30) {
digitalWrite (10, HIGH);
}
else {
digitalWrite (10, LOW);
}
//The red LED lights if the current temperature above 30 degrees
if (t> = 30) {
digitalWrite (11, HIGH);
}
else {
digitalWrite (11, LOW);
}
// Output collected information on the display
lcd.setCursor (0, 0);
// Set the cursor to the zero position
lcd.print ("TEMP:");
lcd.print (t);
// Output temperature
lcd.createChar (1, degree);
lcd.setCursor (7, 0);
lcd.print (char (1));
// Create the degree symbol and its output
lcd.print ( "HUM:");
lcd.print (h);
lcd.print( "%");
// Output of information collected on the Serial Port Monitor
Serial.print( "HUM:");
```

```
Serial.print (h);
Serial.print( "%");
Serial.print( "TEMP:");
Serial.print (t);
Serial.print( "C");
Serial.print( "\ n");
}
```

The results of this sketch are shown in Figure 11. The title TEMP shows the current temperature. The title HUM shows the level of humidity.

Figure 11. The results of laboratory work 3

3.5. Laboratory work 4

The objective of this work is the connection of the gas sensor MQ-2 to the Arduino Uno board. We should connect one red LED that will indicate a high concentration of hydrocarbon gases and smoke in the air. The projected system will give to the LCD information about the current level of the gas concentration.

This work needs the following equipment: the equipment of the previous laboratory work, a gas sensor module (MQ-2), a LED, connection wires.

A student should connect the module using these contacts: the first (the voltage + 5V), the second (ground) and the fourth (analog information). The fourth contact is connected to analog port A1.

We should load the library "***TroykaMQ***" for work with this module. The operator of the microcontroller program "***#define PIN_MQ2 port_number***" specifies the port number to which the information contact of the sensor is connected. The function "***MQ2 mq2 (PIN_MQ2)***" creates the object for use with gas sensors. We should transmit to this object the port number. The

function "***pinMode (port_number, INPUT)***" sets the number of the information reception port.

The module *MQ-2* must be calibrated in order to receive correct values while scanning information from the environment. Such calibration is made in two stages. First we use the function "***mq2.heaterPwrHigh ()***" for heating of the probe**,** and then values are calibrated using the function "***mq2.calibrate ()***".

The calibration takes a minute, so the screen can display a primitive animation which is determined by such code:

```
lcd.setCursor (3, 0);
lcd.print( "LOADING");
delay (1000);
lcd.print( ".");
delay (1000);
lcd.print( ".");
delay (1000);
lcd.print( ".");
delay (1000);
lcd.setCursor (10, 0);
lcd.print ( "");
```

We can use the function "***analogRead (port_number)***" for determination of the gas concentration level in the air.

The LED will indicate a high concentration of gas and smoke. It is connected to port 6. If the gas concentration exceeds 300 units, the LED switches on.

Assemble the circuit as shown in Figure 12.

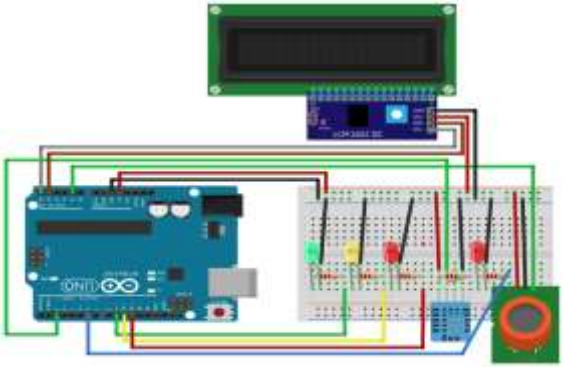


Figure 12. The circuit of laboratory work 4

The results of the system work are shown in Figure 13.

Figure 13. The results of laboratory work 4

3.6. Laboratory work 5

The objective of this work is to connect a real-time clock, set it up and display the current time.

This work needs the following equipment: the equipment of the previous laboratory work, the Real Time Clock Module (DS3231), connecting wires.

The Real-time clock module is self-powered by batteries. This allows you to store data for a long time without an external supply of the module. The DS3231 uses the first four contacts to connect. Connect the **GND** contact to the ground**,** the **VCC** contact should connect to +5**V**, **SDA** and **SCL** contacts are connected to the ports on Arduino Uno.

We must download library "***iarduino_RTC***" for using the module DS3231. Determination of the module type is made with the help of the function "***iarduino_RTC time (RTC_DS3231)***". The clock starts with this function "***time.begin ()***". The first time you must set the time. This is done by using the function "***time.settime (seconds, minutes, hours)***". After successfully setting the clock, you must remove or comment out this function.

The results of this system work are shown in Figure 14.

Figure 14. The results of laboratory work 5

3.7. Laboratory work 6

The objective of this work is to connect an infrared (IR) sensor so as to enable setting the clock from the remote control.

This work requires the following equipment: equipment from the previous laboratory work, an infrared sensor, a remote controller, connection cables.

The IR module uses all three contacts to the connection. The first contact connects with the ground, the second contact connects with the voltage +5V**,** and the third contact connects to port 3.

It is possible to control the Arduino Uno via a remote controller. You need to know remote key codes in the hexadecimal form. We can find them online if a remote controller is from the known brand. In our case, the type of the remote controller is LG AKB33659511. The codes of the main keys for the remote control are given.

We must download library "***IRremote***" to use the infrared module. The function "***IRrecvirrecv (port_number)***" defines a port that is connected to the module.

3.8. Laboratory work 7

The objective of this work is to connect a buzzer (speaker) for an audio alert about the high gas level. The alarm project will enable the alert at the time which will be set with the help of the remote controller.

This work needs the following equipment: the equipment from the previous laboratory work, the buzzer, connecting wires.

The buzzer (speaker) uses three contacts for connection with the system. The first contact connects to the ground**.** The second contact receives information from port 9, from which a melody will be transmitted. The third contact is connected to the voltage +5V.

We should load library ***"NewTone"*** for using the speaker. The function "***NewTone (port_number, pitch, duration)***" makes sounds.

We can take the example code of the manual clock setting of the previous laboratory work to create an alarm.

Figure 15 shows the process of setting up the alarm clock from the remote controller.

Figure 15. The alarm clock setting

It is necessary to design the printed-circuit board of the project after a successful final test of the project. The scheme designed in the core ISIS is transferred to the core ARES. The optimal tracks of the printed-circuit board will be designed with the help of the core ARES of the Suite Proteus Professional. Development of the project is completed at this stage.

However, the realization of the project is possible on the next levels of teaching (a course project design or a bachelor degree project design).

The considered technology is intended not only for full-time students. Such students can work directly in their university laboratories. It can be used in remote training, which is especially important for distance students.

The Arduino Uno board is not expensive, and all students can have such a microcontroller board at home. Internet communication (Skype, E-mail) with a tutor can help to recognize and solve technical problems.

CONCLUSIONS

The technology of remote microcontroller study was developed at the Kiev International University. So far, the implementation of this technology has been carried out only partially. Manufacturing of a printed-circuit board has not been realized yet**,** and it is given as a home task for advanced students.

This technology is used for the preparation of specialists of various forms of training. However, we observe the efficiency of the technology in the distance form of training. Distance students do not have stable possibilities of direct communication with teachers and this technology makes such communication more active.

The implementation of this technology has resulted in an increase in students' grades by 20% on average. With distance students, the increase was 27% on average. In the future, the technology will be further

developed for training and testing in the disciplines Computer Electronics and Computer Circuit Engineering.

SUMMARY

This paper describes a teaching technique of microcontroller system designing. Designing of microcontroller systems demands theoretical knowledge as well as practical experience. Therefore, this technique has several stages.

First, students receive theoretical knowledge of basic principles of microcontroller system designing. Students can receive this knowledge from the university WEB-site. There are many multimedia courses. They explain in what manner students can use equipment and software. Further, students learn the C-programming for AVR microcontrollers. The next stage of the learning is working out a project. A project has a system circuit and C-programs which support the microcontrollers functions. Further, a project is simulated with the help of the ISIS subsystem of the Proteus simulator. Such simulation helps students to see the quality of the project functioning. They can look through several variants of the project and select the optimal variant of a circuit and a C program. The next stage of designing projects is their realization with the help of real equipment. The authors propose a technique of receiving practical experience in microcontroller system design. This technique is based on the microcontroller board Arduino Uno. The Arduino Uno is a microcontroller board which uses the ATmega328P microcontroller. The Arduino Uno allows students to construct real microcontroller devices. A real project should be realized on a printed-circuit board. Such a printed-circuit board is projected in the ARES subsystem of the Proteus simulator. Seven laboratory works of different complexity developed by the authors lead students step-by-step to receiving professional skills. These works allow students to receive the first experience in microcontroller systems designing. Besides teaching, this technique has tests which can estimate students' practical skills. This technique allows students to do a lot of projects of various complexity. It will give students a deeper experience in the designing of microcontroller systems.

REFERENCES

1. Hsiung S., Ritz J., Jones R., Eiland J. *Design and Evaluation of a Microcontroller Training System for Hands-on Distance and Campus-Based Classes.* Journal of Industrial Technology. 2010. v. 26. № 4. P. 1–10.

2. Hedley M., Barrie S. An Undergraduate Microcontroller Systems Laboratory. *IEEE Transactions on Education.* 1998. v. 41. № 4. P. 17–25.

3. Che Fai Yeong, Hisyam A.R., SuE., Lee Ming A Hands-on Approach To Teaching Microcontroller. *Systemics, Cybernetics and Informatics*. 2013. v. 11. № 1. P. 55–59.

4. Bondarenko V.E. Technology of Satellite and Mobile Communication in Modern Distance Education. Second International Conference Modern (e -) Learning, July, 2007, Bulgaria. Proceedings. ITHEA. Sofia, 2007. c. 120–127.

5. Bondarenko V.E. Mobile Communication Technology as a Tool of Educational Process. *Information Technology and Knowledge*. 2007. v. 1. № 1. p. 78–80.

Information about author:
Bondarenko V. E.,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
15, Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.3

ПРИНЦИПИ, МЕТОДИ ТА ПРИЙОМИ ПРОСТОРОВОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ МІСТОБУДІВНОЇ СИСТЕМИ ЗАКЛАДІВ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

Булах І. В.

ВСТУП

Одним із пріоритетних завдань уряду України, виконання якого прописано в Конституції нашої держави, є формування ефективної архітектурно-містобудівної системи закладів охорони здоров'я, яка покликана на забезпечення якісною організацією та доступністю для всіх категорій населення. Для реалізації окресленого завдання, на жаль, виникає низка перешкод, пов'язаних із політичними, економічними, матеріально-ресурсними, соціальними, регіональними та іншими факторами. Для досягнення якісних змін в архітектурно-містобудівній організації системи охорони здоров'я сьогодні в Україні потрібно докорінно переосмислити та перебудувати усталену майже за століття мережу лікувальних закладів. Функціонуюча мережа закладів охорони здоров'я України була розроблена і реалізована у радянський період, цілком відповідаючи діючим на той час принципам і методам організації, типології, нормативним документам, різноманіттю лікарської спеціалізації, можливостям ресурсного та фінансового забезпечення. На жаль, найбільш гуманна до людини, безоплатна для громадян й одна з кращих в світі за рівнем охоплення населення, ця потужна архітектурно-містобудівна система лікувальних закладів за низкою обставин сьогодні не спроможна в повному і належному обсязі виконувати свої функції. Серед основних вад архітектурно-містобудівної організації медичного обслуговування в Україні, розглянутих у попередніх дослідженнях[1], необхідно підкреслити такі: інфантильність та недорозвиток первинного рівня медичної допомоги, надмірна кількість, дублювання закладів та спеціалізація госпітального рівня. Кожна з окреслених проблем викликає багаторівневі похідні обтяження, які у сукупності з відсутністю регулярних покрокових реформ галузі та її недофінансуванням, призвели до кризисної ситуації

[1] Булах І.В. Передумови реорганізації мережі дитячих лікувальних закладів України. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування.* Київ, 2017. № 47. С. 444–450.

в охороні здоров'я нашої країни. Підтвердженням слугує те, що колись зразкова організація охорони здоров'я України, у 2017 р. отримала 135 місце з 148 можливих у рейтингу рівня розвитку медицини в країнах світу, знаходячись позаду Судану (131-е місце), Іраку (132-е місце), Афганістану (133-е місце), Мадагаскару (134-е місце) і поряд з Конго, Анголою, Угандою, Нігерією та іншими африканськими країнами[2].

1. Медичні передумови розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я

Для вирішення ситуації, що сталася, у дослідженні містобудівна система закладів охорони здоров'я розглядається як складна ієрархічна структура, основними ієрархічними компонентами якої виступають містобудівні мережі закладів первинного, вторинного та третинного рівнів медичного обслуговування населення. Запропонована концепція базується на системному підході, за якого зазначені мережі є складовими елементами цілісної системи охорони здоров'я України, володіючи при цьому певною автономністю, виконуючи власні функції, а також забезпечуючи поступовість і доступність населення до отримання сучасних і якісних медичних послуг. Концепція є результатом аналізу теорії та практики архітектурно-містобудівної організації закладів охорони здоров'я в провідних країнах світу[3,4,5], а також пострадянських країн, які досягли успіхів у архітектурно-містобудівної реорганізації лікувальних закладів.

Перспектива закономірного розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я України повинна формуватись на основі нових засадничих медичних принципів, оголошених у межах напряму реформи галузі[6], серед яких особливо вагомими

---

[2] The Legatum Institute: рейтинг розвитку медицини в країнах світу в 2017 р.

[3] Булах І.В. Сучасний закордонний досвід проектування енергоефективних лікарень (досвід Сінгапура). *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ, 2018. № 50. С. 332–440.

[4] Булах І.В. Досвід організації системи охорони здоров'я у Сполучених Штатах Америки та Франції із визначенням у них місця мережі дитячих лікувальних закладів. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ, 2018. № 52. С. 165–173.

[5] Булах І.В. Архітектурно-містобудівна організація закладів охорони здоров'я Німеччини та Великобританії. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ, 2019. № 53. С. 126–134.

[6] Міністерство охорони здоров'я: Національна стратегія реформування системи охорони здоров'я в Україні на період 2015-2020 років.

виявляються наступні: орієнтованість на людей, орієнтованість на результат та орієнтованість на втілення. *Орієнтованість на людей* означає, що система повинна відповідати сучасним потребам суспільства. Якість організації та умов надання медичних послуг, здатність адаптуватися під мінливі потреби та можливості виступають фундаментальною основою у процесі реформування системи охорони здоров'я. Структурна побудова системи охорони здоров'я складається з низки соціальних інституцій, злагоджена робота яких залежить від злагоджених відносин між компонентами системи, включаючи управлінські, постачальні і отримуючи медичне обслуговування, науково-дослідницькі і освітні підрозділи тощо. Цей медичний принцип свідчить про необхідність забезпечення доступного функціонального та архітектурно-містобудівного взаємозв'язку між містобудівними мережами медичного обслуговування та їх відповідними складовими закладами охорони здоров'я у різноманітті типів розпланувань міських та сільських поселень України. В аспекті медичного обслуговування дітей цей принцип найбільш розкривається у змісті концепції дитячого лікувального комплексу – забезпечення якісного та доступного лікування дітей, з можливістю вибору у різноманітті сучасних закладів охорони здоров'я, максимально наближених до місць проживання пацієнтів.

Принцип *орієнтованості на результат* націлений на зумовлення прийняття рішень на усіх рівнях організації та управління сфери охорони здоров'я на основі кінцевої результативності медичної допомоги, ефективності використаних ресурсів та коштів, комплексної оцінки результату діяльності пацієнтами. З метою підвищення результативності система охорони здоров'я повинна інтегрувати сучасний досвід менеджменту та управління, робота яких пов'язана з регулярною оцінкою виконання етапів та кінцевих результатів, внесення на цій основі пропозицій щодо удосконалення та покращення подальшої роботи, виявлення перспективних шляхів розвитку та усунення неефективних елементів. Вказаний принцип свідчить про важливість задоволення потреб суспільства не кількісним, а якісним рівнем забезпечення медичного обслуговування, про необхідність скорочення малоефективної, застарілої та дубльованої множини лікувальних закладів. Принцип вказує на пріоритет розвитку містобудівної мережі ПМД для попереджування гострих станів захворюваності населення, зниження навантаження на госпітальні рівні.

Медичний принцип *орієнтованості на втілення* спрямований на активізацію послідовної підготовчої роботи до отримання намічених

результатів, організації моніторингу, розробки механізмів корегування, часових меж реалізації. Проекція змісту принципу на тему дослідження підкреслює значимість динамічного та змінного складника розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я, потребу у її синергетичних процесах, самоорганізації, саморегуляції та адаптації під мінливі демографічно-соціальні, політично-економічні, епідеміологічні, містобудівні та інші умови, можливості та виклики. Для реалізації зазначеного принципу в організацію архітектурно-містобудівної системи закладів охорони здоров'я потрібно долучати позитивні риси ринкових відносин, конкуренції, моніторингу ефективності, досвід впровадження і роботу яких можна спостерігати на практиці приватних медичних закладів.

Окрім розглянутих медичних принципів та положень, слід відмітити загальні принципи, притаманні сучасному розвитку архітектурно-містобудівної проектної діяльності, серед яких: гнучкість, варіативність, багатофункціональність, естетизація проектних рішень. *Принцип гнучкості* полягає у трансформативних якостях, у забезпеченні можливості та умов для проведення корегування і удосконалення лікувальних процесів, зміни методів і форм медично-технічного обслуговування, залежно від потреб і можливостей населення України. В більшості країн з високим рівнем розвитку системи охорони здоров'я розповсюдженими виявились інноваційні методи медичного обслуговування, такі як: телемедицина, інтерактивні, відео та електронні засоби спілкування, консультацій, обговорень, перевірки діагнозів та методів лікування, навчання та інші[7][8]. Зазначені новітні методи організації медичного обслуговування, безумовно, слід відносити до допоміжних заходів, які, однак, потребують врахування під час архітектурно-містобудівної організації системи, особливо у сільській місцевості, де не завжди є можливість створення повноцінної медично-матеріальної бази. *Принцип варіативності та багато-функціональності* під час формування містобудівної системи лікувальних закладів та комплексів, складових мереж всіх рівнів медичного обслуговування визначає динамічні властивості

[7] Bulakh I., Kozakova O., Didichenko M. The innovative trends in architecture and urban planning of health care institutions. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering.* Bhopal, 2019. Vol. 9. Issue 1. Pp. 317–323. DOI: 10.35940/ijitee.A4111.119119

[8] Bulakh I., Kozakova L., Didichenko M., Chala O. Health Care Architectural and Urban Planning Systems In The United States of America and France. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. Bhopal, 2019. Vol. 9(2). Pp. 1622–1627. DOI:10.35940/ijitee.B7377.129219

цілісності, її окремих складових елементів, з можливістю в разі потреби перепрофілізації лікувального закладу або його відділень, зміни структури та місткості. *Принцип естетизації та індивідуалізації* передбачає активізацію потенцій лікувальних властивостей зовнішнього та внутрішнього середовища медичних будівель, благоустрою та дизайну ландшафту їх територій, з урахуванням індивідуальних потреб та особливостей людей і особливо дітей. Тривалий уніфікований та типово-індустріальний підхід до проектування та будівництва закладів охорони здоров'я, притаманний пострадянським країнам, на жаль, був спрямований на створення і функціонування лікувального закладу на зразок «машини» для лікування знеособленого населення, без «зайвих» ознак краси, людяності, відчуття співмасштабності та співчуття[9].

2. Процеси та принципи закономірного розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я

Для реалізації нових медичних положень, загальних сучасних принципів розвитку містобудівної проектної діяльності, беручи до уваги глобальні процеси урбанізації міського середовища одночасно з обмеженням у вільних земельних ресурсах, ритму і темпу суспільного життя, а також відсутність необхідного забезпечення у фінансуванні сфери охорони здоров'я України, варто шукати нових принципів містобудівного розвитку системи, її складових мереж. Відштовхуючись від фундаментальної тріади Вітрувія про сутність архітектури, у дослідженні пропонуються матриця структуро-формуючих містобудівних процесів побудови принципів динамічного розвитку системи дитячих лікувальних комплексів. Запропонована матриця дозволяє систематизувати та описати процеси, які характерні для динамічного розвитку складових компонентів містобудівної системи закладів охорони здоров'я – містобудівних мереж первинної (ПМД), вторинної (ВМД) та третинної (ТМД) медичної допомоги, а також загальносистемні закономірні явища.

Перша сходинка та ієрархічний рівень системи – містобудівна мережа закладів ПМД відповідає за «міцність» і «форму» побудови системи, виступаючи при цьому матеріальною основою закономірного розвитку системи дитячих лікувальних комплексів.

[9] Bulakh I.V. Artistic and Aesthetic Formation and Evolution of Architectural and Urban Planning Space. *Science and Innovation*. Kyiv, 2019. Volume 15. No 5(5). pp. 57–66. DOI: 10.15407/scine15.05.057

Наступний рівень – містобудівна мережа закладів ВМД відповідає за «користь» і структурну побудову системи, виступаючи при цьому функціональною основою закономірного розвитку системи дитячих лікувальних комплексів. Третій ієрархічний рівень – містобудівна мережа закладів ТМД, потребує розширення тріади Вітрувія з введенням «унікальності» організаційної побудови системи, виступаючи при цьому спорадичною основою закономірного розвитку містобудівної системи.

Загальносистемні процеси, які водночас притаманні як окремим елементам системи, так і її цілісності, відповідають за доцільність системи, виступаючи гармонійною основою побудови і динамічного розвитку містобудівної системи. Динамічна основа загальносистемних процесів системи відповідає за «міцність», синергетична основа – за «користь», індивідуальна основа – за «красу» побудови і закономірного розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я. Сукупність запропонованих 3 мережевих та 3 загальносистемних процесів виступила підґрунтям для формування матриці з 24 відповідних закономірних структуроформуючих містобудівних принципів (6 базових та 18 похідних) динамічного розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я. Базові принципи відповідають за побудову містобудівних рівнів системи та її цілісності, похідні принципи уточнюють дію базових у різноманітті видів поселень, а також на загальнодержавному рівні.

Перший базовий *принцип розосередження* спрямований на *дифракцію* та розгалуженість містобудівної мережі закладів ПМД шляхом її подрібнення до стану, що відповідає доступності та потребам суспільства. Принцип розосередження передбачає динамічну структуру, яка має хвилеподібний змінний характер, що дозволяє збільшувати та зменшувати кількість закладів ПМД у структурі населених пунктів залежно від демографічно-соціальних та урбаністичних явищ, попиту та потреб на медичне обслуговування. На державному рівні принцип трансформується у похідний принцип *розгалуженість*, метою якого виступає формування різноманіття лікувальних закладів первинної ланки з покриттям доступного медичного обслуговування до 90% населення країни. У міському середовищі найкрупніших, крупних та великих міст пропонується видозміна принципу у явище *локальності*, що пов'язано з гетерогенною структурою міської тканини, неоднорідністю кількості і щільності населення у різних міських

районах, а також хвилеподібною часткою дитячої категорії в них. Для групи середніх та малих міст, а також сільської місцевості, в яких спостерігаються найменші показники щільності забудови та проживаючого населення, при цьому збільшуються рекомендовані нормативні значення, принцип набирає вираження *детерміно-ваності*, тобто найменшої просторово-часової змінюваності та відносної стабільності.

Другий основний принцип *комплексності* відповідає за конгруентність, універсальність та багатопрофільність лікувальних закладів вторинної містобудівної ланки медичної допомоги, їх взаємну узгодженість між собою у складі цілісності системи. Відповідаючи за функціонування містобудівної системи лікувальних закладів на державному рівні, принцип характеризується як *синтезування* основних типів вторинного госпітального рівня на шляху забезпечення повноцінною лікарняною допомогою усіх вікових категорій населення. Для міського середовища найкрупніших, крупних та великих міст актуальним значенням принципу виявляється *повторення* або *реплікація*, тобто знаходження необхідної кількості та місткості лікарень ВМД шляхом їх повторення (але не дублювання) у межах міських територій в узгодженості із рекомендованими нормативними показниками. Група середніх та малих міст, території сільської місцевості потребує трансформації значення принципу у *розсіяння* або *дисперсію*, тобто за необхідності допустима організація дрібних лікарень інтенсивного лікування з метою дотримання нормативних радіусів доступності або їх зменшення, у разі незадовільного стану транспортної інфраструктури, з одночасним відхиленням (у бік збільшення) від рекомендованих часових показників інших типів лікарень ВМД.

Третій засадничий принцип *іррегулярності*, який відповідає за містобудівну організацію мережі закладів третинної медичної допомоги, сприяє формуванню нерегулярного розміщення спеціалізованих та унікальних лікарень та їх комплексів. На рівні державної організації містобудівної системи закладів охорони здоров’я дія принципу спрямовується на *поляризацію*, покликану на забезпечення територіально-планувальних функціональних зв’язків між спеціалізованими лікарняними структурами в межах території країни. У разі розміщення закладів ТМД у середовищі найкрупніших, крупних та великих міст принцип отримує ознаки *концентрації,* тобто пошуку стану рівноваги у потенції та потребі спеціалізації медичної допомоги та відповідної доцільності.

Сукупність середніх, малих міст, сільська місцевість вимагає видозміни принципу у *розрідженість*, що пов'язано із унеможливленням забезпечення покриття якісним спеціалізованим медичним обслуговуванням територій з розрідженою щільністю проживаючого населення, водночас з потребою її концентрації на регіональних (госпітальних) рівнях.

Впровадження четвертого базового принципу *фрактальності* створює умови для активізації здатності містобудівної системи закладів охорони здоров'я до динамічного та закономірного синергетичного розвитку у просторі і часі на основі самоорганізації, саморегуляції шляхом утворення самоподібних структур. На рівні загальнодержавного формування містобудівної мережі закладів охорони здоров'я принцип трактується як *тяжіння* або *атракторізація*, передбачає множину станів (етапів) або точок фазового простору динамічної містобудівної системи лікувальних закладів, до якої вона прямує у часо-просторовому вимірі. Рівень міського середовища найкрупніших, крупних та великих міст потребує інтерпретації принципу як *метаболізм,* тобто динамічного стану оновлення кількості, місткості та локалізації складових елементів містобудівної системи лікувальних закладів шляхом попереднього їх розміщення на основі граничних нормативних показників та поступового корегування в узгодженості з прогнозними та об'єктивними потребами та попитом суспільства. Групу середніх та малих міст, території сільської місцевості доцільно розглядати з позиції *повторювання* або ітерації в аспекті збільшення типів і кількості лікувальних закладів, їх територіальної концентрації до поступового наближення до нормативних рекомендацій.

Наступний засадничий принцип – *кластерність,* відповідальний за територіальне утворення всередині містобудівної системи закладів охорони здоров'я відносно автономних одиниць (комплексів), які забезпечують повний цикл медичного обслуговування за певним напрямом. Пропонується така класифікація медичних кластерів: за містобудівним рівнем (первинного, вторинного, третинного медичного обслуговування); за територіальними межами (функціонування низки об'єднаних лікувальних закладів на визначеній території регіону, міста); за профілем компонентів (лікувальні, освітні, науково-дослідні заклади, складові медичної промисловості інші супутні та допоміжні структури); за напрямом спеціалізації (дитячі, кардіологічні,

онкологічні, психоневрологічні, нефрологічні, трансплантаційні та інші спеціалізовані лікарні), за віковою категорією пацієнтів (дитяче, доросле, населення похилого віку). Особливість та специфіка медичних кластерів полягає в тому, що на шляху до емерджентних результатів в них можуть бути задіяні компоненти з різних містобудівних рівнів та мереж містобудівної системи закладів охорони здоров'я, а також з інших суміжних та допоміжних сфер (освітньої, науково-дослідної, промислової та інших).

На державному рівні організації містобудівної системи лікувальних закладів принцип видозмінюється у напрямі *інтегральності* різноманіття складових кластерів з метою координації їх розвитку. У міському середовищі найкрупніших, крупних та великих міст, у яких одночасно існують різні типи кластерних об'єднань, доцільна інтерпретація принципу як *консолідованість*, тобто формування різнобічних внутрішніх та зовнішніх взаємозв'язків між окремими кластерами з метою емерджентного результату за рахунок об'єднання, інтеграції та згуртованості. Група середніх та малих міст, території сільської місцевості вимагають трансформації принципу у *комутаційність* (лат. commutatio – зміна, commutare – змінювати), яка пов'язана з пошуком та встановленням зв'язків між окремими лікувальними закладами, їх комплексами у певній територіальній одиниці та поза її межами.

Останній стрижневий принцип – *своєрідність*, який покликаний створити підґрунтя для індивідуалізації архітектурно-містобудівних проектних рішень під час формування містобудівної системи закладів охорони здоров'я. На загальнодержавному планувальному рівні принцип отримує ознак *регіональності*, яка передбачає інтеграцію низки територіальних особливостей, потрібностей та потенцій у динамічному розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я. Розуміння принципу як *ідентичності* доцільно у разі планування лікувальних закладів у містобудівному середовищі найкрупніших, крупних та великих міських поселень. У цьому разі ідентичність націлена на ув'язку сукупності впливових зовнішніх та внутрішніх факторів, різноманіття середовищ міських контекстів, оточуючої забудови та перспектив розвитку кожного окремого і сформованого міста. У містобудівному середовищі середніх та малих міських поселень, а також для територій сільських населених пунктів доцільна інтерпретація принципу у значенні *ініціалізації*, пов'язаної з потребою у новій розбудові

містобудівної системи лікувальних закладів, її активації, у індивідуальному визначенні та поступовому корегуванні параметрів функціонування та динамічного розвитку.

3. Методи і прийоми формування і розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я

Обґрунтування принципів територіальної організації містобудівної системи закладів охорони здоров'я стало підґрунтям для визначення методів реалізації мережі дитячих лікувальних комплексів. З огляду на октаедртність основоположних принципів містобудівного формування системи лікувальних закладів та тесерактовість кумулятивної матриці засадничих та похідних принципів у дослідженні пропонується 6 груп методів і 18 прийомів їх реалізації. Перша група, яка підпорядкована принципу розосередження та спрямована на розгалуження містобудівної мережі первинної ланки, складається із методу дифузії та низки прийомів (розподілу, насичення, достатності). Друга група, заснована на принципі комплексності і відповідна за універсальність та багатопрофільність лікувальних закладів вторинної ланки медичної допомоги, складається із методу поліфонічності та прийомів ансамблевості, ритмічності, асиметричності. Третя група, пов'язана із принципом іррегулярності містобудівної організації госпітальної мережі ТМД, спрямована на нерегулярне розміщення спеціалізованих лікарень, реалізується методом вибірковасті та прийомами приєднання, відокремлення, групування. Четверта група, яка складається з методу генеративності і прийомів поєднаності, відмінності та подібності, підкорюється дії принципу фрактальності, що відповідає за самоорганізацію та саморегуляцію містобудівної системи закладів охорони здоров'я. П'ята група методу скупчення та прийомів взаємозв'язковості, інтеграції та розсіювання, пов'язана із принципом кластерності, які у сукупності ставлять на меті територіальне угрупування та взаємозв'язок різнорідних лікувальних комплексів, в тому числі дитячої спрямованості. Остання група, представлена методом контекстуальності та прийомами протиставлення, палімпсесту та новаційності, зв'язана із активацією принципу своєрідності, відповідає за самобутність та індивідуалізацію архітектурно-містобудівного проектування цілісності містобудівної системи закладів охорони здоров'я.

Метод дифузії – процес насичення міської тканини типологічним різноманіттям закладів первинної медичної допомоги, з метою вирівнювання їх концентрації до нормативних показників із урахуванням щільності проживаючого населення у сукупності планувальних одиниць території міського середовища. На загальнодержавному рівні формування і розвитку містобудівної системи лікувальних комплексів метод дифузії вмикає дію *прийому насичення*, який корегує міру зростання або спадання кількості і потужності закладів первинної медичної ланки у суцільному територіальному вимірі країни. *Прийом розподілу* або екстрагування, який передбачає розподіл міської території на ділянки із різним характером забудови (історична, типова, висотна, малоповерхова, ущільнена та інші) та відмінною кількістю населення, доцільно використовувати у міському середовищі найкрупніших, крупних та великих міст. На цій основі обираються оптимальні типи закладів ПМД, формуються відповідні комбінації з їх нерівномірним розміщенням у різноманітті структури міста. Для групи середніх та малих міст, а також сільської місцевості метод дифузії доцільно здійснювати шляхом використання *прийому достатності*, покликаного на організацію дрібних осередків надання ПМД у населених пунктах з низькою щільністю забудови та проживаючого населення.

Для пояснення шляхів реалізації першої групи методу і прийомів доцільно проаналізувати існуючий стан та надати пропозиції щодо формування складових компонентів дитячого лікувального комплексу на рівні мережі закладів ПМД у межах м. Києва. Незважаючи на кращій в країні рівень розгалуженості мережі комунальних та приватних закладів ПМД, особливо сконцентрованих у центральних та історичних міських зонах, аналіз показників щільності проживаючого населення по різних міських ділянках свідчить про нестачу медичних закладів на периферії та у районах з активним висотним житловим будівництвом. Комбінація принципів розосередження та локальності дозволяє розмістити нові місця для надання медичних послуг ПМД в залежності від наявних та прогнозних потреб на міських ділянках з прискореним темпом житлового будівництва. Використання методу дифузії дозволяє наситити міську тканину типологічним різнобарв’ям закладів ПМД до стану, відповідного до нормативних показників, щільності населення. Прийом розподілу корегує заповнення проблемних

ділянок міської території з позиції характерних особливостей забудови, її висотності, ущільненості та ін.

Метод поліфонічності, призначений для активізації принципу комплексності та територіальної трансформації багатопрофільних лікарень за 6 ступенями інтенсивності лікування, з одночасною інтеграцією дитячих відділень у структуру їх функціональної побудови з метою усунення спеціалізації госпітальних закладів за віковими ознаками. Реалізації методу на загальнодержавному рівні формування стає можливою під впливом *прийому ансамблевості*, відповідного за різноманітність функціональної структури госпітальної мережі вторинної ланки медичного обслуговування населення країни. *Прийом ритмічності*, тобто розміреності і узгодженості територіального розміщення типологічних різновидів лікарень ВМД доцільно використовувати у міському середовищі найкрупніших, крупних та великих міст. Для групи середніх та малих міст, а також сільської місцевості метод поліфонічності доцільно здійснювати шляхом використання *прийому асиметричності,* покликаного на формування нерівномірної структури містобудівної мережі лікарень ВМД, що пов'язано з демографічною розрідженістю проживаючого населення та незначною щільністю забудови.

Ілюстрацією механізмів дії другої групи методу і прийомів, пов'язаних із принципом комплексності, слугує діагностика існуючого положення та пропозиції щодо формування і розвитку складових компонентів дитячого лікувального комплексу на рівні містобудівної мережі закладів ВМД на прикладі м. Києва. Згідно з проведеним у дослідженні аналізом існуючого стану госпітальної мережі неспеціалізованих лікарень та особливостей їх містобудівного розміщення в м. Києві функціонує 16 багатопрофільних лікарень, призначених для обслуговування дорослої категорії населення (Київська міська клінічна лікарня № 1–№ 10, № 12, № 14, № 15, № 17, № 18 та Олександрівська клінічна лікарня), з яких 12 закладів знаходяться у правобережній частині міста, а 4 лікарні забезпечують госпітальну медичну допомогу дорослим мешканцям міста на лівобережжі столиці держави. Характерним недоліком фактичного територіального розміщення лікарень містобудівної мережі вторинної медичної ланки виступає їх згуртованість та дублювання, яке особливо виражене в історичній частині міста. Окрім цього, частина з цих лікарень побудована у

першій половині XX сторіччя, має фізичне зношення, нераціонально використовує земельну ділянку.

Пропонується наступний перерозподіл: 4 багатопрофільні лікарні інтенсивного лікування (Київська міська клінічна лікарня швидкої медичної допомоги, Київська міська клінічна лікарня № 8, Київська міська клінічна лікарня інтенсивного лікування № 3, Київська міська клінічна лікарня № 6); 2 лікарні відновного лікування (Київська міська клінічна лікарня № 2, Київська міська клінічна лікарня № 14); 4 лікарні планового лікування (Київська міська клінічна лікарня № 1, Київська міська клінічна лікарня № 4, Київська міська клінічна лікарня № 9, Київська міська клінічна лікарня № 12); 2 хоспіса (Київська міська клінічна лікарня № 7, Олександрівська клінічна лікарня); 2 лікарні медико-соціальної допомоги (Київська міська клінічна лікарня № 17, Київська міська клінічна лікарня №18); 6 перинатальних центрів (пологовий будинок № 4, № 7, ПАГ, Isida, Adonis, Лелека), 2 пологових будинки (пологовий будинок при Київській міській клінічній лікарні №1, пологовий будинок № 5).

У Києві функціонує 11 комунальних пологових будинків та 3 приватні, більшість з яких згідно з територіальним аналізом концентруються поруч один з одним, тим самим дублюючи функції. Пропозиціями щодо містобудівного розташування зазначених лікувальних закладів виступають такі: надати статус перинатальних центрів 6 пологовим будинкам (3 приватним та 3 комунальним) та залишити 2 пологових будинки, які рівномірно охоплюють територію міста. Інші наявні пологові лікарні пропонується перепрофілювати під інші функції або використовувати як перинатальні центри приватної чи змішаної форми підпорядкування та фінансування. У перспективі необхідно влаштування перинатальних центрів у периферійній частині Голосіївського та Деснянського районів.

Метод вибірковості призначений для виявлення та ґрунтовного аналізу провідних напрямів лікувальної діяльності лікарняних структур з метою виявлення або спростовування доцільності їх спеціалізації й приєднання до містобудівної мережі третинного медичного забезпечення. *Прийом групування* дозволяє на рівні території держави забезпечити формування містобудівної спеціалізованої госпітальної системи, яка створює необхідні умови та потенції для прогресивного та інноваційного розвитку локальних осередків з лікувальними, освітніми, науково-дослідними та

експериментально-виробничими функціями. *Прийом відокремлення* пов'язаний з виокремленням та формуванням спеціалізованих та унікальних лікарень у міському середовищі найкрупніших, крупних та великих міст. Для групи середніх, малих міст, сільської місцевості, метод вибірковості реалізується завдяки використанню *прийому приєднання,* покликаного на пошук і встановлення територіальних зв'язків з найближчими спеціалізованими закладами містобудівної мережі лікарень ТМД.

Для пояснення шляхів реалізації третьої групи методу і прийомів, пов'язаних із принципом іррегулярності, у дослідженні приводиться діагностика та рекомендації щодо розвитку складових компонентів дитячого лікувального комплексу на рівні містобудівної мережі закладів ТМД у межах м. Києва. Як свідчить аналіз територіального розміщення існуючих в Києві дитячих лікарень, їх основна частина знаходиться на правобережній частині міста (16 лікарень) і лише 1 – на лівому березі міста. З 17 дитячих лікарень 3 складають спеціалізовані дитячі лікувальні заклади (інфекційний, туберкульозний та нейрохірургічний профілі), 10 – комунальні та 4 приватні лікарні дитячого призначення. Враховуючі вищенадані пропозиції стосовно інтеграції дитячих відділень у склад 22 лікарень містобудівної мережі закладів ВМД Києва, пропонується такий розподіл: організація 1 університетської лікарні, до складу якої входять суміжні за місцем розташування Київська міська дитяча клінічна лікарня № 2, Київська міська клінічна лікарня № 3 та пологовий будинок № 6; 4 дитячі спеціалізовані лікарні республіканського значення за профілем лікування: Київська міська дитяча клінічна інфекційна лікарня (інфекційний профіль), НДСЛ «Охматдит» (онкологічний профіль), Київська міська дитяча клінічна лікарня № 1 (нефрологічний та кардіологічний профіль), Дитяча клінічна лікарня № 7 (нейрохірургічний профіль); 4 дитячі лікарні: Дитяча клінічна лікарня № 4, Дитяча клінічна лікарня № 6, Дитяча клінічна лікарня № 8, Дитяча клінічна лікарня № 9.

Метод генеративності покликаний на активізацію динамічного та закономірного синергетичного просторово-часового розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я, її структурних ієрархічних територіальних мереж й лікувальних комплексів шляхом поступової самоорганізації та саморегуляції складових компонентів. На державному містобудівному рівні метод впроваджується через *прийом поєднаності*, дія якого виявляється у

територіальній проекції та корегуванні шляхів реалізації загального змістовного вектору розвитку містобудівної системи лікувальних закладів залежно від сукупності особливостей регіонів країни. *Прийом відмінності* пов'язаний з динамічним оновленням компонентів містобудівних мереж ПМД, ВМД та ТМД у містобудівному середовищі найкрупніших, крупних та великих міст залежно від низки змінних внутрішніх та зовнішніх факторів розвитку та функціонування. *Прийом подібності*, призначений для територій середніх та малих міст, сільської місцевості дозволяє в разі потреби зменшувати місткість та потужність лікувальних закладів з метою доступного забезпечення мешканців малонаселених пунктів медичною допомогою.

Метод скупчення покликаний на сумарну інтегративність складових компонентів медичних кластерів, забезпечуючи типологічне різноманіття цілісності лікувальних угрупувань. *Прийом взаємозв'язковості*, сила дії якого розкривається на державному планувальному рівні організації містобудівної системи закладів охорони здоров'я, відповідає за встановлення комунікаційних зв'язків між окремими групами медичних кластерів. *Прийом інтеграції* у середовищі найкрупніших, крупних та великих міст активізує виконання функції декількох рівнів медичного обслуговування в межах одного лікувального комплексу або закладу. *Прийом розсіювання* у середовищі середніх та малих міст, сільської місцевості скеровує вектор формування медичних кластерів у напряму розрідженого розгалуження містобудівного розміщення лікувальних закладів, з метою попередження їх концентрації на певній території і, як наслідок, зменшення радіусу медичного обслуговування населення.

Метод контекстуальності передбачає індивідуальний шлях формування і розвитку містобудівної системи лікувальних закладів України з урахуванням кращого світового досвіду та тенденцій територіального розміщення сукупності будівель медичного призначення. На загальнодержавному рівні пропонується використання *прийому протиставлення*, зміст якого полягає у осмисленому зіставленні фактичного стану містобудівної системи закладів охорони здоров'я, її складових мереж та лікувальних комплексів з прогнозним станом, пошуком відхилень та рішень щодо корегування. *Прийом палімпсесту* у міському середовищі найкрупніших, крупних та великих міст призначений для урахування історично значущих лікувальних будівель та установ, їх

інтеграції, збереженні та оновленні у межах перспективного розвитку містобудівної системи. *Прийом новаційності* у містобудівному середовищі середніх та малих міських поселень, територій сільських населених пунктів дозволяє впроваджувати нові форми організації медичного обслуговування населення.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження містобудівної системи охорони здоров'я, питань об'єднання та взаємної узгодженості складових елементів цілісності проведено на підґрунті системного підходу, який дозволив розглянути мережу дитячих лікувальних закладів як ієрархічно підпорядковану цілісність лікувальних комплексів, інтегрованих у госпітальні кластери та округи, в яких об'єднуються і взаємодіють елементи системи – містобудівні мережі закладів різних рівнів медичної допомоги.

2. Розглянуто та науково обґрунтовано новий містобудівний об'єкт – дитячий лікувальний комплекс, який набуває цілісного характеру завдяки упорядкованій послідовності мереж лікувальних закладів первинного (ПМД), вторинного (ВМД), третинного (ТМД) рівнів медичної допомоги. Лікування дітей на первинному рівні медичного обслуговування відбувається у закладах ПМД у межах сімейної медицини, на вторинному рівні – в інтегрованих дитячих відділеннях лікарень ВМД, на третинному рівні – у спеціалізованих дитячих та інших лікарнях ТМД.

3. Концепція перспективного розвитку містобудівної системи закладів охорони здоров'я базується на системному підході, враховує нові засадничі медичні положення та принципи, притаманні сучасній архітектурно-містобудівній практиці. Запропоновано матрицю принципів для різних типів міського середовища, яка складається з 6 базових та 18 похідних принципів: розосередження (розгалуженість, локальність, детермінованість), комплексність (синтезування, повторення, розсіяння), іррегулярність (поляризація, концентрація, розрідженість), фрактальність (тяжіння, метаболізм, повторювання), кластерність (інтегральність, консолідованість, комутаційність), своєрідність (регіональність, ідентичність, ініціалізація). Сформульовані 6 груп методів і 18 практичних прийомів реалізації.

АНОТАЦІЯ

Розглянуто актуальність дослідження питань містобудівного розвитку системи закладів охорони здоров'я в умовах реформування медичної сфери. Незважаючи на те, що держава витрачає значну частину ВВП на охорону здоров'я, якість і рівень медичного забезпечення в Україні залишається незадовільним. Це явище викликано тим, що українська система охорони здоров'я є громіздкою та застарілою, в тому числі в архітектурно-містобудівному аспекті, базуючись на радянській організаційній моделі. Складну ситуацію провокують глибинні недоліки, накопичені з 80-х рр. XX ст. у національній системі охорони здоров'я через відсутність поетапної модернізації. З цієї позиції у дослідженні запропоновані принципи, методи та прийоми територіальної організації містобудівної системи закладів охорони здоров'я. Матриця принципів для різних типів міського середовища складається з 6 базових та 18 похідних принципів: розосередження (розгалуженість, локальність, детермінованість), комплексність (синтезування, повторення, розсіяння), іррегулярність (поляризація, концентрація, розрідженість), фрактальність (тяжіння, метаболізм, повторювання), кластерність (інтегральність, консолідованість, комутаційність), своєрідність (регіональність, ідентичність, ініціалізація).

ЛІТЕРАТУРА

1. Булах І.В. Передумови реорганізації мережі дитячих лікувальних закладів України. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування.* Київ, 2017. № 47. С. 444–450. URL: http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/01/201747.pdf.

2. The Legatum Institute: рейтинг розвитку медицини в країнах світу в 2017 р. URL: https://www.li.com/.

3. Булах І.В. Сучасний закордонний досвід проектування енергоефективних лікарень (досвід Сінгапура). *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ, 2018. № 50. С. 332–440. URL: http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/01/2018/201850.pdf.

4. Булах І.В. Досвід організації системи охорони здоров'я у Сполучених Штатах Америки та Франції із визначенням в них місця мережі дитячих лікувальних закладів. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ, 2018. № 52. С. 165–173. URL: http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/01/2018/201852.pdf.

5. Булах І.В. Архітектурно-містобудівна організація закладів охорони здоров'я Німеччини та Великобританії. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Київ, 2019. № 53. С. 126–134. URL: http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/01/2019/201953.pdf.

6. Міністерство охорони здоров'я: Національна стратегія реформування системи охорони здоров'я в Україні на період 2015–2020 років. URL: http://moz.gov.ua/uploads/0/691-strategiya.pdf.

7. Bulakh I., Kozakova O., Didichenko M. The innovative trends in architecture and urban planning of health care institutions. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering.* Bhopal, 2019. Vol.9. Issue 1. Pp. 317–323. DOI: 10.35940/ijitee.A4111.119119.

8. Bulakh I., Kozakova L., Didichenko M., Chala O. Health Care Architectural and Urban Planning Systems In The United States of America and France. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. Bhopal, 2019. Vol. 9(2). Pp. 1622–1627. DOI:10.35940/ijitee.B7377.129219.

9. Bulakh I.V. Artistic and Aesthetic Formation and Evolution of Architectural and Urban Planning Space. *Science and Innovation*. Kyiv, 2019. Volume 15. No 5(5). Pp. 57–66. DOI: 10.15407/scine15.05.057. URL: http://scinn-eng.org.ua/archive/15%285%29/15%285%2904.

Information about author:
Bulakh I. V.,
Candidate of Architecture, Associate Professor,
Associate Professor of Department of Design Architectural Environment
Kyiv National University of Construction and Architecture
31, Povitroflotskyy Ave., Kyiv, 03037, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.4

THE METHOD OF EXPRESSING THE UNCERTAINTY OF DYNAMIC MEASUREMENTS

Vasilevskyi O. M., Didych V. M.

INTRODUCTION

To correctly assess the reliability of dynamic measurement results, it is necessary to demonstrate quantitative values of the quality of such measurements[1,2]. Without knowing these values it is impossible to compare the results of dynamic measurements with each other or with the reference value. Obviously, there is a need to develop methods for assessing the qualitative characteristics of dynamic measurements. The task is complicated by the fact that in the course of dynamic measurements it will be necessary to take into account the transient modes of measuring devices (MD), during which the signal at the output will change significantly[3,4]. Such changes are due to the internal device of MD, consisting of a variety of different masses and springs, capacitances and inductances and other inertial elements, which in turn lead to the emergence of dynamic uncertainty. Static MD conversion equation is not applicable in dynamic mode. Therefore, to describe the relationship between the output data y(t) and the input values x(t) of the measuring devices, it is necessary to go to differential equations[5].

This research was conducted into the basic metrological characteristics displayed when developing new designs of measurement means for the

---

[1] ISO/IEC 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories* (Geneva, Switzerland, ISO, 2005), 28 p.

[2] Vasilevskyi O.M. Methods of determining the recalibration interval measurement tools based on the concept of uncertainty, *Tekhn. Elektrodin.* 6, 81 (2014).

[3] S. Eichstädt, A. Link, C. Elster, Dynamic Uncertainty for Compensated Second-Order Systems, Sensors, 10, 7621 (2010).

[4] Vasilevskyi O.M. Metrological characteristics of the torque measurement of electric motors. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8, 7 (2017).

[5] S. Eichstädt, C. Elster, I. M. Smith and T. J. Esward, Evaluation of dynamic measurement uncertainty – an open-source software package to bridge theory and practice, *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 97–105 (2017).

evaluation of physical quantities, which is seen to be a crucial issue in science, the solution helping to ensure the uniformity of measurements and the identification of core and additional errors (uncertainties) in the measurement of a given type of measurement means.

Therefore, the scientific task of creating methods for estimating the uncertainty of dynamic measurements that would meet international requirements for evaluating the characteristics of measurement quality remains relevant.

1. Basic theoretical information

In case the equation of the measuring transducer is represented in the form

$$Y = K_C X, \tag{1}$$

where X is input signal which describes the measured value of the physical quantity; K_C is the coefficient of the conversion of the measuring device and Y is output signal which describes the measurement result, the mathematical expectation for the input signal will be equal to M[X], and the mathematical expectation of the output signal will be equal to

$$M[Y] = K_C M[X], \tag{2}$$

where *M[Y]* and *M[X]* are the corresponding mathematical expectations of the output and input signals of the measuring device, respectively[6].

The spectral density of the input signal X(t) has the form[7]

$$H_X(\omega) = \lim (2\mathrm{T})^{-1} \left| X(j\omega) \right|^2 \text{ when } \mathrm{T} \to \infty, \tag{3}$$

where $X(j\omega)$ is the Fourier image obtained by replacing the value in the operand of the image $X(s)$ by the values of s for $j\omega$; T is the time of observation; $\omega = 2\pi f$.

---

[6] Vasilevskyi O.M., Yakovlev M.Yu., Kulakov P.I. Spectral method to evaluate the uncertainty of dynamic measurements, *Tekhn. Elektrodin.* 4, 72 (2017).

[7] Gihan Gomah, A traceable time interval measurement with a reduced uncertainty. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 6, 301 (2015).

The expression for the spectral density of the output signal can be represented by the expression[8]

$$H_Y(\omega) = \lim (2\mathrm{T})^{-1} \left|\mathrm{Y}(j\omega)\right|^2 \text{ when } \mathrm{T} \to \infty . \qquad (4)$$

The relationship between the images of the output and input values gives us an expression for the transfer function of the measuring device[9]

$$\mathrm{K_C}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\sum_{k=0}^{m} B_k s^k}{\sum_{q=0}^{n} A_q s^q}, \qquad 5)$$

where *Y(s)*, *X(s)* are the operator images of *Y(t)* output and *X(t)* input signals, respectively; *k*, *q* are the order of the derivatives of *Y* and *X*, respectively; A_q, B_k are the coefficients of the differential equation.

Therefore, we can write that

$$\mathrm{H_Y}(\omega) = \left|K_C(j\omega)\right|^2 H_X(\omega), \qquad (6)$$

where $K_C(j\omega)$ is the frequency characteristic of the measuring transducer[10].

The spectral density of the error signal, reduced to the input, will be equal to

---

[8] Esward T.J., Elster C., Hessling J.P., Analysis of dynamic measurements: new challenges require new solutions, in *Proc. of XIX IMEKO World Congress on Fundamental and Applied Metrology* (2009).

[9] Vasilevskyi O.M., Kulakov P.I., Ovchynnykov K.V., Didych V.M. Evaluation of dynamic measurement uncertainty in the time domain in the application to high speed rotating machinery. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, Volume 8, Article Number 25, 2017 (pages 9). DOI: 10.1051/ijmqe/2017019.

[10] Oleksandr Vasilevskyi, Pavlo Kulakov, Dmytro Kompanets, Oleksander M. Lysenko, Vasyl Prysyazhnyuk, Waldemar Wójcik, Doszhon Baitussupov, A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices, *Proceedings Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108082E.URL: https://doi.org/10.1117/12.2501578.

$$\mathrm{H}_{\Delta X}(\omega) = \left| \frac{K_C(j\omega)}{K_C} - 1 \right|^2 H_X(\omega), \tag{7}$$

K_C – frequency characteristic of the measuring device for ω = 0.

The dispersion of the output signal σ_Y^2 for dynamic measurements can be defined as the square root of the integral of the spectral density of the output signal over all frequencies

$$\sigma_{\mathrm{Y}} = \pi^{-1/2} \left(\int_0^\infty H_Y(\omega) d\omega \right)^{1/2}. \tag{8}$$

Taking into account the equations (3) and (6) above, the dispersion of the output signal σ_Y^2 (8) can be represented on the basis of the spectral density of the input signal and the frequency characteristic of the measuring channel used (measuring means)

$$\sigma_{\mathrm{Y}} = \pi^{-1/2} \left(\mathrm{T}^{-1} \int_0^\infty \left| K_C(j\omega) \right|^2 \left| X(j\omega) \right|^2 d\omega \right)^{1/2}, \tag{9}$$

where $\left| K_C(j\omega) \right|$ is the frequency response module of the measuring device, used for dynamic measurements[11].

Similarly, the variance of the error signal, reduced to the input, will be equal to

$$\sigma_{\Delta X} = \pi^{-1/2} \left(\int_0^\infty \left| \frac{K_C(j\omega)}{K_C} - 1 \right|^2 \left| X(j\omega) \right|^2 d\omega \right)^{1/2}. \tag{10}$$

[11] Vasilevskyi O. M. EVALUATION OF UNCERTAINTY OF THE RESULTS OF DYNAMIC MEASUREMENTS, CONDITIONED THE LIMITED PROPERTIES USED THE MEASURING INSTRUME. 9 International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. 2016. Berlin, Germany (9–10 November, 2016). URL: http://mathmet.org/resources/DYNAMIC2016/Vasilevski,-Alexsandre-Dynamic-uncertainty.pdf.

The frequency response module of the measuring device is determined by the formula

$$\left|K_C\left(j\omega\right)\right| = \left(\mathrm{a}^2\left(\omega\right) + b^2\left(\omega\right)\right)^{1/2}, \tag{11}$$

where $\mathrm{a}\left(\omega\right)$, $\mathrm{b}\left(\omega\right)$ are respectively, the real and imaginary parts of the frequency response MD $K_C\left(j\omega\right)$[12].

The spectral function of the incoming signal *X(jω)* is related to its time function *X(t)* by the Laplace expression[13]

$$\mathrm{X}\left(s\right) = \int_0^\infty X\left(t\right)e^{-st}dt\,. \tag{12}$$

When the input signal passes through the measuring device (measuring channel), distortions arise associated with the limited properties of the measuring channel and as a result, the main harmonics of the input signal under study appear pulsations ω_0. To study the measurement uncertainty, a certain frequency ω_0 is allocated from the entire frequency spectrum, which is associated with the limited nature of the measuring device.

For a finite time interval, the infinity sign may be replace by the total observation time *T*.

The dynamic error of the measuring transducer, brought to the input, in the time domain can be represented by the expression

$$\Delta X\left(\mathrm{t}\right) = \pi^{-1/2}\int_0^\infty \sigma_{\Delta\mathrm{X}}e^{j\omega t}d\omega = \pi^{-1/2} \left[\int_0^\infty \sigma_{\Delta\mathrm{X}}\cos\left(\omega\mathrm{t}\right)d\omega + j\int_0^\infty \sigma_{\Delta\mathrm{X}}\sin\left(\omega\mathrm{t}\right)d\omega\right]. \tag{13}$$

---

[12] Vasilevskyi O.M. A frequency method for dynamic uncertainty evaluation of measurement during modes of dynamic operation, *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, 6, 202, (2015).

[13] Bartoli C., Beug M.F., Bruns T., Elster C., Esward T., Klaus L., Knott M., Kobusch M., Saxholm S. and Schlegel C., *Traceable dynamic measurement of mechanical quantities: objectives and first results of this European project*, Int. J. Metrol. Qual. Eng., 3, 3, (2012), 127–135.

Consequently, the dynamic error that occurs due to the limited properties of the measuring device can be estimated in the time domain based on the model equation of the spectral function of the input signal and the frequency response of the measurement (13).

It is obvious that expression (13) consists of real and imaginary parts, and when evaluating an error, it is necessary to analyze the amplitude value of the dynamic error, expression (13) needs to be converted to the form

$$\left|\Delta X(\mathrm{t})\right| = \left[\left(\int_0^{\infty} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta \mathrm{X}}\cos(\omega \mathrm{t})\,d\omega\right)^2 + \left(\int_0^{\infty} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta \mathrm{X}}\sin(\omega \mathrm{t})\,d\omega\right)^2\right]^{1/2}. \quad (14)$$

When, for instance, prior knowledge about the amplitude of the frequency spectrum of the measurand is available in terms of a frequency function, then equation (14) can be rewritten in the form

$$\left|\Delta X(\mathrm{t})\right| = \left[\left(\int_0^{\pi \mathrm{F_s}} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta \mathrm{X}}\cos(\omega \mathrm{t})\,d\omega\right)^2 + \left(\int_0^{\pi \mathrm{F_s}} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta \mathrm{X}}\sin(\omega \mathrm{t})\,d\omega\right)^2\right]^{1/2}, \quad (15)$$

with $F_s=1/T_s$ the sampling frequency.

According to GUM[14] Supplement 2, the uncertainty associated with the estimation error is then given as the variance of the corresponding rectangular probability distribution, i.e. the dynamic uncertainty of the measuring device can be estimated from the formula

$$u_D(t) = \sqrt{\left(\int_0^{\pi \mathrm{F_s}} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta \mathrm{X}}\cos(\omega \mathrm{t})\,d\omega\right)^2 + \left(\int_0^{\pi \mathrm{F_s}} \pi^{-1/2}\sigma_{\Delta \mathrm{X}}\sin(\omega \mathrm{t})\,d\omega\right)^2} \Big/ \sqrt{3}. \quad (16)$$

To confirm the proposed theoretical basis for estimating the dynamic uncertainty of measuring instruments, we will perform a study of the characteristics of the change in dynamic uncertainty by the example of a vibration acceleration measurement using an accelerometer.

[14]Evaluation of measurement data. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100, GUM 1995 with minor corrections, 1st edn. (2008).

2. Experimental research

The differential equation describing the dynamic relationship of the input and output values of the vibration acceleration measuring transducer has the form

$$\frac{d^2 X_s(t)}{dt^2} + 2h\frac{dX_s(t)}{dt} + h_k^2 X_s(t) = \frac{F_0}{m}\cos(\omega_0 t), \qquad (17)$$

where $F(t) = F_0\cos(\omega_0 t)$ is the harmonic forced power of the oscillation of the surface of the object (input value); F_0 is the force amplitude; ω_0 is the angular frequency of forced power; $X_s(t)$ represents the the mechanical vibrations of the inertial mass; m is the mass of the accelerometer; c is the damping variable; k is the equivalent rigidity of the piezoelements, $h = c/2m$ is the damping coefficient; $h_k = \sqrt{k/m}$ is the critical value damping coefficient[15].

The accelerometer is located on the electrospindle of the engine and performs spot metering of the vibration in the frequency[16] range from 6 kHz to 10 kHz, which is created by the operation of the roller bearings (Fig. 1)[17].

The electrospindle is a mechanical system consisting of a metal spindle body, an mounting system to asynchronous motor, rolling bearings and a shaft that is mechanically connected to the motor rotor and designed for operation at ultrahigh angular speeds (Fig. 1). It must provide a high peak power and constant action power, maximum radial and axial stiffness, maximum rotation speed, high demands on accuracy and performance. The use of electrospindles with an integrated motor for high-speed machining is possible for a number of practical applications where the required spindle speed can be 8000 rpm.

---

[15] Vasilevskyi O.M., Kulakov P.I., Dudatiev I.A., Didych V.M., Kotyra Andrzej, Suleimenov Batyrbek, Assembay Azat, Ainur Kozbekova Ainur, Vibration diagnostic system for evaluation of state interconnected electrical motors mechanical parameters, Proc. *SPIE 10445*, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104456C (August 7, 2017); doi:10.1117/12.2280993.

[16] Podzharenko V.O., Vasilevskyi O. M. Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement. *Proceedings of Donetsk National Technical University*. 88, 138–144 (2005).

[17] Vasilevskyi O.M. Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy, *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, 73, 52–56 (2012).

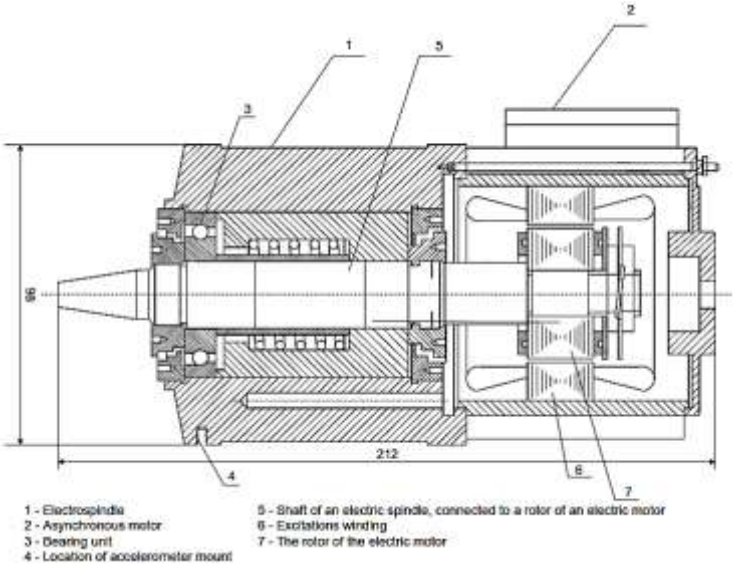


Fig. 1. Constructive drawing electrospindle

One of the most critical components of any high-speed electrospindle is the bearing system. The electrospindle should have high speeds of rotation, transfer the necessary torque and power to the tool, have good load capacity and a long service life. Bearings must meet all these requirements.

To ensure trouble-free operation, regular maintenance and diagnosis of bearing assemblies are necessary to determine the incipient defects. These defects are determined at frequencies from 6 to 10 kHz[18]. Therefore, the measurement of vibration in this frequency range is an actual scientific task, which allows to determine the incipient defects at early stages and to perform maintenance of the bearing units according to actual need[19].

To study the dynamic characteristics of measuring device that are used for dynamic measurements, one must resort to differential equations

[18] IEC 60747-14-4:2011, Semiconductor devices – Discrete devices – Part 14-4: Semiconductor accelerometers (IEC, Switzerland, 2011).

[19] Vasilevskyi O.M., Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2014, 5.04: 403.

describing the dynamic relationship between output and input quantities. Therefore, the frequency characteristics of measuring devices are very convenient for compiling a model equation for dynamic measurements and estimating uncertainty, which is caused by the limited properties of measuring devices in the dynamic mode of operation, with sinusoidal input signals. In addition, in the frequency domain, it is possible to investigate a complex sinusoidal signal, which is vibration.

The equivalent circuit of the measuring channel of vibration acceleration[20] shown in Figure 2.

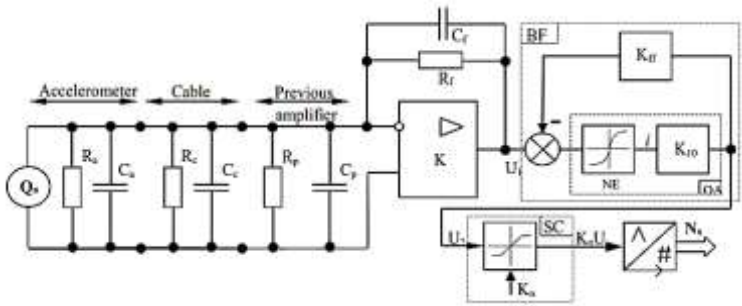


Fig. 2. Equivalent circuit measuring channel of vibration

In figure 2 is designated: Q_a − electric charge; R_a − accelerometer resistance; C_a − accelerometer capacity; R_c − resistance of the connecting cable; C_c − capacity of the connecting cable; R_p − resistance of the input circuit of the preamplifier; C_p − capacity of the input circuit of the preamplifier; R_f − resistance of the feedback loop; C_f − capacity of the feedback loop; K − preamplifier; U_1 − output voltage of preamplifier; BF − bandpass filter; NE − non-linear element; K_{10} − transfer coefficient BF; K_{ff} − feedback factor BF; OA − operational amplifier; SC − scale converter; K_n − amplification factor SC; N_x − code analog to digital converter.

[20] Vasilevskyi O.M., Kucheruk V.Y., Bogachuk V.V., Gromaszek K., Wójcik W., SmailovaS., Askarova N. The method of translation additive and multiplicative error in the instrumental component of the measurement uncertainty. *Proc. SPIE* 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2016, 1003127 (September 28, 2016). DOI:10.1117/12.2249195.

The uncertainty budget of the constituent elements of the measuring channel of the acceleration in relative units is shown in Table 1. On the basis of an experimental study of the uncertainty budget of the measurement channel of the vibration acceleration (Tab. 1), a the relative value of the combined standard uncertainty was calculated without taking into account the dynamic component of the uncertainty, which is 0.36%.

Table 1

Uncertainty budget of the constituent elements of the measuring channel of vibration acceleration

Elements	**Value of relative uncertainty, %**	**The expanded uncertainty (coverage factor 1.96 at confidence level 95%), %**	**Distribution**
Accelerometer	0.3	0.59	Uniform (rectangular)
Preliminary charge amplifier	0.02	0.04	Uniform (rectangular)
Bandpass filter	0.2	0.39	Uniform (rectangular)
Scale converter	0.01	0.02	Uniform (rectangular)
ADC	0.005	0.01	Uniform (rectangular)
Background noise	$2.14 \cdot 10^{-6}$	$4.19 \cdot 10^{-6}$	Normal
The combined standard uncertainty ($\tilde{u}_s$)	0.36	0.71	Normal
Mean value			2.93 m/s^2

The transfer function of the measuring device will take the form of

$$H(s) = \frac{K_{MM}}{s^2 + 2hs + h_k^2}, \tag{18}$$

where K_{MM} is the coefficient of proportionality of the measuring channel of vibration acceleration.

Turning to the domains of frequency and separating the real and imaginary parts, we obtain an expression for the module of the frequency characteristics of the measuring device for vibration acceleration

$$\left|\mathrm{K_C}(j\omega)\right| = \left|\frac{K_{MM}}{(j\omega)^2 + 2h(j\omega) + h_k^2}\right| = \left[\frac{K_{MM}}{\omega^4 - 2\omega^2 \mathrm{h}_\mathrm{k}^2 + 4\omega^2 h^2 + h_k^4}\right]^{1/2}, \quad (19)$$

$$K_C = \frac{mK_{MM}}{k}. \quad (20)$$

The input signal $F_0 m^{-1}\cos(\omega_0 t)$ of vibration acceleration has the form of

$$X(j\omega) = j\omega F_0\left(\omega_0^2 + (j\omega)^2\right)^{-1}\ \mathrm{m}^{-1}, \quad (21)$$

where ω_0 is the cyclic frequency input vibration acceleration, which ranges from 6 to 10 kHz that is, with a minimum value of 18,849.5 and the maximum value is 31,415.9 radians/second.

The main number of defects manifest themselves by excitation of high-frequency vibrations in the frequency range of 6-10 kHz and it is for this reason that the boundary values of the range (less than 6 kHz, greater than 10 kHz) are chosen as the minimum and maximum input harmonic signals ω0, which is included in equation (14).

The module image of the input vibration acceleration is written as

$$\left|X(j\omega)\right| = \omega F_0\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^{-1} m^{-1}. \quad (22)$$

From source literature[21], it is known that the amplitude of forced harmonic power F_0 is $3\cdot 10^{-4}$ m. The mass of the accelerometer[22] is $m = 4\cdot 10^{-2}$ kg. The damping variable for the piezoelectric accelerometers is equal to 0.5, equivalent rigidity of the piezoelements is k = 2, and the minimum observation time T = 300 s. The proportionality factor or gain K_{MM} of the measuring channel of the vibration acceleration is 10^5.

[21] T. Bruns, M. Kobusch, Traceability of dynamic force and torque calibrations by means of laser-Dopplerinterferometry, Proc. SPIE 5503, 602–607 (2004).

[22] Broch J.T. Mechanical Vibrations and Shock measurements. 2nd edition. Brüel & Kjær (1984).

Substituting the resulting values of the module of the frequency characteristics (19), (20) and the image of the input signal (22) in equation (10), we obtain an expression for the evaluation of the variance of the error signal of vibration acceleration in the spectral area, reduced to the input

$$\sigma_{\Delta X} = \pi^{-1/2}\left(\int_0^{\infty}\frac{\omega F_0\left[\left(k\left(h_k{}^2-\omega^2\right)-m\left(h_k{}^2-\omega^2\right)^2-4m\omega^2h^2\right)^2+4k^2\omega^2h^2\right]}{2Tm\left(\omega_0^2-\omega^2\right)\left(m\left(h_k{}^2-\omega^2\right)^2+4m\omega^2h^2\right)^2}d\omega\right)^{1/2}. \quad (23)$$

To represent the characteristicsof the changes in the uncertainty in the dynamic measurement vibration acceleration in the time domain, which is caused by the inertial properties of the measuring transducer in its dynamic mode we must express a Fourier expression for inverse transformation in the form of (15).

Since expression (15) consists of real and imaginary parts, and in assessing the uncertainty we are interested in the amplitude value of dynamic uncertainty, expression to evaluate the dynamic uncertainty (16) can be written as

$$u_D(t) = \left[\left(\int_0^{\pi F_s}\pi^{-1/2}\sigma_{\Delta X}\cos(\omega t)\,d\omega\right)^2+\left(\int_0^{\pi F_s}\pi^{-1/2}\sigma_{\Delta X}\sin(\omega t)\,d\omega\right)^2\right]^{0.5}\Big/\sqrt{3}. \quad (24)$$

Equation (24) was solved using the Maple 12 mathematical package, taking into account expression (23). With a given minimum frequency of the input signal of vibration acceleration of 6 kHz and a given observation time of 300 s, the value of dynamic uncertainty is 0.156 m/s^2 (Fig. 3). If the observation period increased to 600 s with a vibration acceleration input frequency of 6 kHz, the dynamic uncertainty value decreased to 0.116 m/s^2 (Fig. 4). The nominal value of the signal of the vibration acceleration of the bearings of the motor of the motor is 2.93 m /s^2. The characteristics of the change in the dynamic uncertainty of the vibration acceleration measurement as a function of the time variable obtained using the Maple 10 mathematical package are presented in Figures 1 and 2 with a minimum frequency of the input signal of vibration acceleration of 6 kHz with an observation time of 300 s and 600 s, respectively.

Substituting the values of the above shock coefficients into expressions (23) and (24), we obtain the amplitude value of the dynamic

uncertainty of the measurement of the vibration acceleration, which is 0.088 m/s^2, while the frequency of the input signal is the vibration acceleration of 10 kHz, and the time of observation of the vibration acceleration T = 300 s (Fig. 5). If the observation time increases to 600 s at the same frequency of the input vibration acceleration signal, the value of dynamic uncertainty decreases to 0.064 m/s^2 (Fig. 6). The characteristics of the change in the dynamic uncertainty of measurement as a function of the time variable obtained using the Maple 12 mathematical package are presented in Figures 3 and 4 with a maximum frequency of the input vibration acceleration signal of 10 kHz with an observation time of 300 s and 600 s, respectively.

Based on the proposed spectral method for estimating the uncertainty of dynamic measurements, an estimate was obtained of the uncertainty of dynamic measurements of the vibration acceleration of the electric motor spindle roller bearings. The proposed approach is based on mathematical models of the spectral function of the input signal of the vibration acceleration and frequency characteristics of the measuring transducer to accelerate the vibration. This in turn makes it possible to take into account the values of dynamic uncertainties when estimating the total uncertainty of measuring the vibration acceleration.

To calculate the maximum relative value of the uncertainty of the dynamic measurement of vibration acceleration, we divide the obtained maximum value of dynamic uncertainty 0.156 m/s^2 (Fig. 3) by the nominal value of the vibration acceleration of $\bar{X}$ = 2.93 m/s^2, as a result of which we obtain[23]

$$\tilde{u}_D = \frac{u_D(t)}{\bar{X}} 100\% = \frac{0.156}{2.93} 100\% = 5.32\%. \qquad (25)$$

When calculating the relative value of the uncertainty of the dynamic measurement of vibration acceleration from formula (23) and (24) for the frequency of 6 kHz and the observation time 600 s, we obtain 3.96% (Fig. 4). At a frequency of 10 kHz and an observation time of 300 s (Fig. 5), we get the relative dynamic uncertainty of the measurement of

[23]Vasilevskyi O.M., Kulakov P.I., Didych V.M. Technique Of Research Uncertainty Dynamic Measurements Of Vibration Acceleration Of Rotating Machines. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE).* 2016. Volume 11. Issue 5. Ver. III. PP. 34-39. DOI: 10.9790/1676-1105033439.

3 %. At a frequency of 10 kHz and an observation time of 600 s (Fig. 6), we get the relative dynamic uncertainty of the measurement of 2.18%.

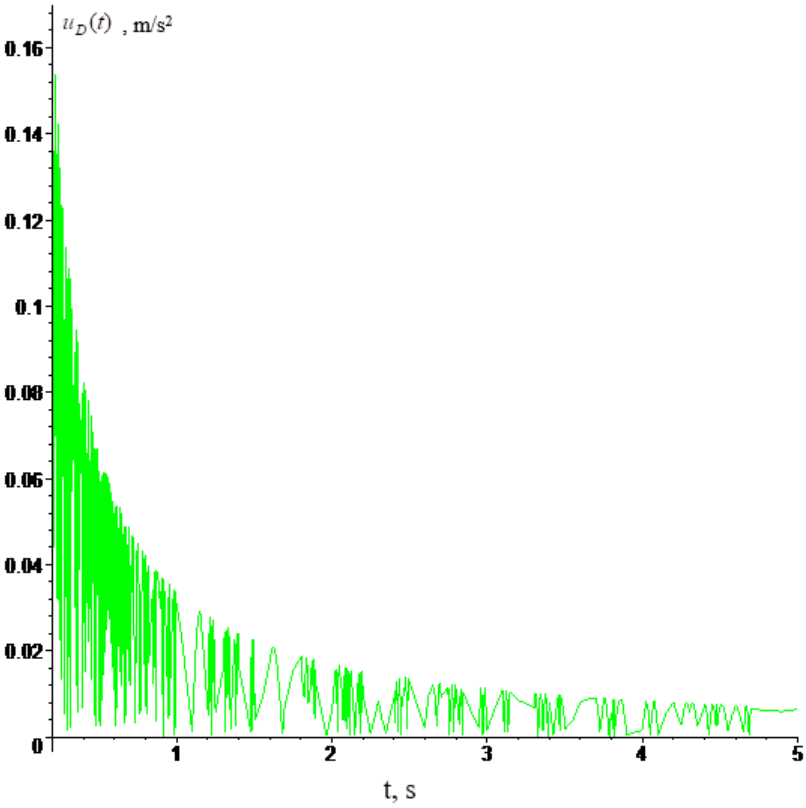


Fig. 3. Uncertainty of dynamic measurement of vibration acceleration at a frequency of 6 kHz and observation time of 300s

The uncertainty budget of the dynamic measurement of the vibration acceleration for the observation time of 300 s and 600 s at frequencies of 6 and 10 kHz is shown in Table 2. The maximum value of dynamic uncertainty is 5.32% at a frequency of 6 kHz at a observation time of 300 s (Tab. 2).

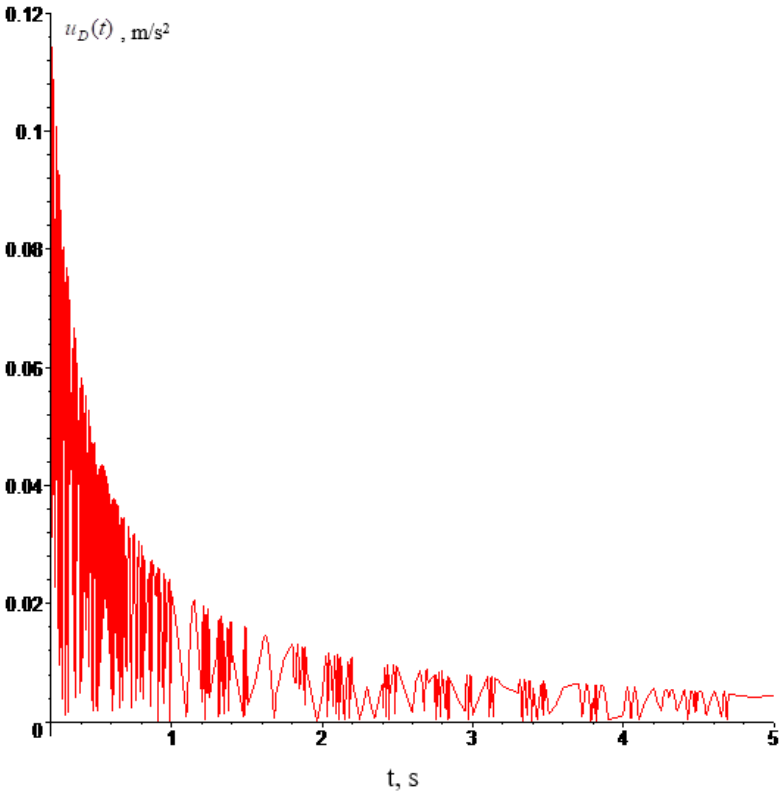


Fig. 4. Uncertainty of dynamic measurement of vibration acceleration at a frequency of 6 kHz and observation time of 600s

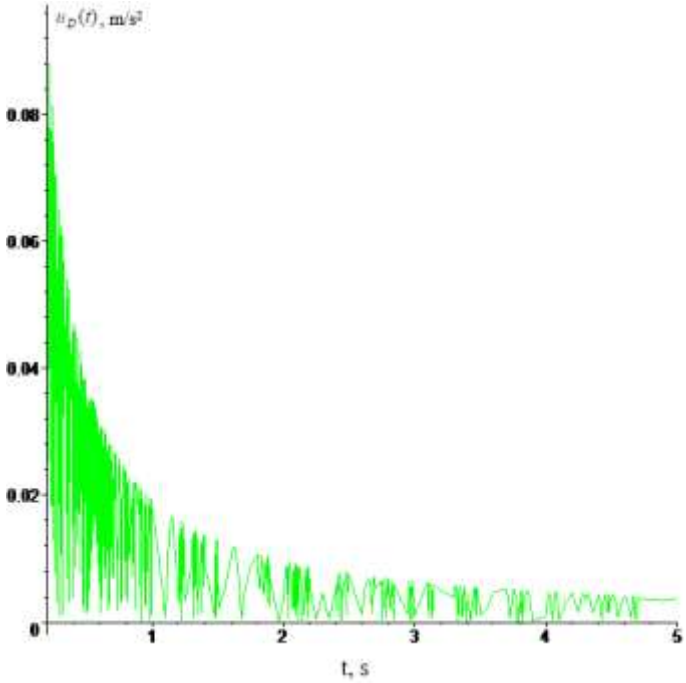


Fig. 5. Uncertainty of dynamic measurement of vibration acceleration at a frequency of 10 kHz and observation time of 300s

The relative combined uncertainty measurement of the vibration acceleration, taking into account the relative dynamic uncertainties $\tilde{u}_D$ (Tab. 2) and the relative combined standard uncertainty $\tilde{u}_s$ (Tab. 1), is calculated by the formula

$$\tilde{u}_C = \sqrt{\tilde{u}_D^2 + \tilde{u}_s^2} = \sqrt{5.32^2 + 0.36^2} = 5.33\% . \qquad (26)$$

Thus, the maximum value of the relative combined uncertainty of the vibration acceleration measurement is 5.33% with an observation time of 300 s and a frequency of 6 kHz. At a monitoring time of 600 s at a frequency of 6 kHz, the combined uncertainty value is 3.98%. At a frequency of 10 kHz at a observation time of 300 s, the combined

uncertainty is 3.02% and at a observation time of 600 s at the same frequency of 2.21%.

Table 2

Uncertainty budget of the constituent elements of the measuring channel of vibration acceleration

Quantity	Mean value, m/s^2	Frequency of the study, kHz	Observation time, s	Value of dynamic uncertainty, m/s^2	The expanded dynamic uncertainty (coverage factor 1.96 at confidence level 95%), m/s^2	Value of relative dynamic uncertainty, %
The vibration acceleration	2.93	6	300	0.16	0.32	5.32
		6	600	0.12	0.24	3.96
		10	300	0.09	0.18	3
		10	600	0.06	0.12	2.18

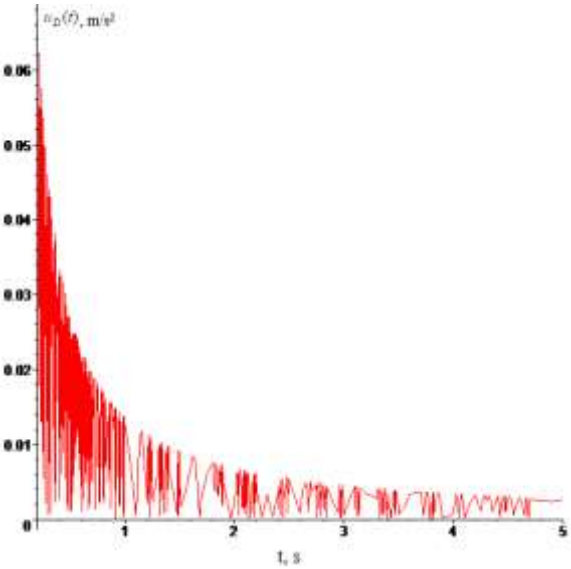


Fig. 6. Uncertainty of dynamic measurement of vibration acceleration at a frequency of 10 kHz and observation time of 600s

CONCLUSIONS

The spectral method for estimating the uncertainty of dynamic measurements proposed by the authors allows calculating the amplitude values of dynamic uncertainties without contradicting international requirements for assessing the quality of measurements – the concept of uncertainty. In turn, this approach helps to ensure uniformity of measurements, which makes it possible to compare the results of dynamic measurements carried out by various measuring instruments and to conduct tests by various laboratories in leading countries. The proposed method was tested in assessing the dynamic uncertainty of measuring the vibration acceleration of a roller bearing of an electric motor, which proved its validity and efficiency.

The described approach to estimating the dynamic uncertainty of measuring instruments can be used for any measuring instruments that are characterized by dynamic components of any type.

SUMMARY

A spectral method for estimating the dynamic uncertainty of measuring instruments based on a mathematical model of the frequency characteristic of a measuring instrument and a model of the spectral function of an input signal is presented. The model equation for estimating the amplitude value of the dynamic measurement uncertainty is obtained, which is caused by the limited properties of the measuring devices when a measuring signal passes through it in dynamic operation modes. A mathematical simulation of the characteristic of the dynamic uncertainty variation during the passage of a measuring signal through a measuring transducer is performed using the dynamic model of a vibration transducer as an example. Thus, the maximum value of the relative combined uncertainty of the vibration acceleration measurement is 5.33% with an observation time of 300 s and a frequency of 6 kHz. At a monitoring time of 600 s at a frequency of 6 kHz, the combined uncertainty value is 3.98%. At a frequency of 10 kHz at a observation time of 300 s, the combined uncertainty is 3.02% and at a observation time of 600 s at the same frequency of 2.21%. It helps to ensure the uniformity of measurements and enables comparison of the results of dynamic measurements made by different measuring devices and testing by different laboratories of leading countries.

REFERENCES

1. ISO/IEC 17025:2005. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Geneva, Switzerland, ISO, 2005), 28 p.
2. Vasilevskyi O.M. Methods of determining the recalibration interval measurement tools based on the concept of uncertainty. *Tekhn. Elektrodin.* 6, 81, 2014.
3. Eichstädt S., Link A., Elster C. Dynamic Uncertainty for Compensated Second-Order Systems. *Sensors.* 10, 7621 (2010).
4. Vasilevskyi O.M. *Metrological characteristics of the torque measurement of electric motors*. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 8, 7, 2017.
5. Eichstädt S., Elster C., Smith I.M. and Esward T.J. Evaluation of dynamic measurement uncertainty – an open-source software package to bridge theory and practice, *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 97–105 (2017).
6. Vasilevskyi O.M., Yakovlev M.Yu., Kulakov P.I. Spectral method to evaluate the uncertainty of dynamic measurements. *Tekhn. Elektrodin.* 4, 72 (2017).
7. Gihan Gomah. A traceable time interval measurement with a reduced uncertainty, *International Journal of Metrology and Quality Engineering.* 6, 301 (2015).
8. Esward T.J., Elster C., Hessling J.P. Analysis of dynamic measurements: new challenges require new solutions, in *Proc. of XIX IMEKO World Congress on Fundamental and Applied Metrology* (2009).
9. Vasilevskyi O.M., Kulakov P.I., Ovchynnykov K.V., Didych V.M. Evaluation of dynamic measurement uncertainty in the time domain in the application to high speed rotating machinery. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. Volume 8, Article Number 25, 2017. DOI: 10.1051/ijmqe/2017019.
10. Oleksandr Vasilevskyi, Pavlo Kulakov, Dmytro Kompanets, Oleksander M. Lysenko, Vasyl Prysyazhnyuk, Waldemar Wójcik, Doszhon Baitussupov. A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices. *Proceedings Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108082E. URL: https://doi.org/10.1117/12.2501578.
11. Vasilevskyi O.M. Evaluation of uncertainty of the results of dynamic measurements, conditioned the limited properties used the measuring instrume. 9 International Workshop on Analysis of Dynamic

Measurements. 2016. Berlin, Germany (9–10 November, 2016). http://mathmet.org/resources/DYNAMIC2016/Vasilevski,-Alexsandre-Dynamic-uncertainty.pdf.

12. Vasilevskyi O.M. A frequency method for dynamic uncertainty evaluation of measurement during modes of dynamic operation. *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, 6, 202, (2015).

13. Bartoli, M.F. Beug, T. Bruns, C. Elster, T. Esward, L. Klaus, A. Knott, M. Kobusch, S. Saxholm and C. Schlegel, *Traceable dynamic measurement of mechanical quantities: objectives and first results of this european project*, Int. J. Metrol. Qual. Eng., 3, 3, (2012), 127–135.

14. Evaluation of measurement data. *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100, GUM 1995 with minor corrections, 1st edn. (2008).

15. Vasilevskyi O.M., Kulakov P.I., Dudatiev I.A., Didych V.M., Kotyra Andrzej, Suleimenov Batyrbek, Assembay Azat, Ainur Kozbekova Ainur, *Vibration diagnostic system for evaluation of state interconnected electrical motors mechanical parameters, Proc. SPIE* 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104456C (August 7, 2017); doi:10.1117/12.2280993.

16. Podzharenko V.O., Vasilevskyi O.M. *Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement*, Proceedings of Donetsk National Technical University, 88, 138–144 (2005).

17. Vasilevskyi O.M. Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy. *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, 73, 52–56 (2012).

18. IEC 60747-14-4:2011, *Semiconductor devices – Discrete devices – Part 14-4: Semiconductor accelerometers* (IEC, Switzerland, 2011).

19. Vasilevskyi O.M., Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2014, 5.04: 403.

20. Vasilevskyi O.M., Kucheruk V.Y., Bogachuk V.V., Gromaszek K., Wójcik W., SmailovaS., Askarova N., *The method of translation additive and multiplicative error in the instrumental component of the measurement uncertainty*, *Proc. SPIE* 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2016, 1003127 (September 28, 2016). DOI:10.1117/12.2249195.

21. Bruns T., Kobusch M. Traceability of dynamic force and torque calibrations by means of laser-Dopplerinterferometry, Proc. SPIE 5503, 602–607 (2004).

22. Broch J.T. Mechanical Vibrations and Shock measurements. 2nd edition. Brüel & Kjær (1984).

23. Vasilevskyi O.M., Kulakov P.I., Didych V.M. Technique Of Research Uncertainty Dynamic Measurements Of Vibration Acceleration Of Rotating Machines // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). 2016. Vol. 11. Issue 5. Ver. III. PP. 34-39. DOI: 10.9790/1676-1105033439.

Information about authors:
Vasilevskyi O. M.,
Doctor of Engineering Sciences,
First Vice-Rector,
Professor of Department of Metrology and Industrial Automation
Vinnytsia National Technical University
95, Khmelnitskoye Shose, Vinnitsya, 21021, Ukraine

Didych V. M.,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Department of Biophysics,
Informatics and Medical Equipment
Vinnytsia National Medical University named after M. I. Pirogov
56, Pirogova, Vinnitsa, 21018, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.5

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАВЛЕНИХ СИРІВ ЛІКУВАЛЬНО-ПРОФІЛАКТИЧНОГО СПРЯМУВАННЯ ІЗ КРІОПОРОШКОМ «БУРЯК»

Гачак Ю. Р., Гутий Б. В.

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку харчових технологій останніми роками спрямовані на виробництво конкурентно-здатного асортименту, призначеного для забезпечення раціонального, повноцінного збалансованого – з елементами функціонального, оздоровчого і масового харчування[1,2]. Сучасна складна екологічна обстановка в Україні вимагає створення продуктів, в тому числі і плавлених сирів, з різноманітними наповнювачами та біодобавками, в тому числі і з лікарськими рослинами та спеціями[3,4,5]. Як відомо, лікувальні властивості харчових лікарських рослин зумовлені наявністю в них біологічно активних речовин, включаючи різноманітні вітаміни, мікро-, макроелементи і різного роду ферменти[6].

---

[1] Bilyk, O. Substantiation of the method of protein extraction from sheep and cow whey for producing the cheese «Urda» / O. Bilyk, N. Slyvka, B. Gutyj, H. Dronyk, O. Sukhorska. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Харків. 2017. В. 3. № 11(87). С. 18–22.

[2] Kaminarides, S. Effect of added milk and cream on the physicochemical, rheological and volatile compounds of Greek whey cheeses / S. Kaminarides, K. Nestoratos, T. Massouras. *Small Ruminant Research*. Volume 113, Issues 2–3, July 2013, Pages 446–453. DOI https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.04.009.

[3] Gutyj, B. The elaboration of cheese masses of therapeutic and prophylactic direction with cryoadditive “Pumpkin” / B. Gutyj, Y. Hachak, J. Vavrysevych, V. Nagovska. *“EUREKA: Life Sciences”*. 2017. № 1, 19–26.

[4] Gutyj B. The influence of cryopowder “Garbuz” on the technology of curds of different fat content / B. Gutyj, Y. Hachak, J. Vavrysevych, V. Nagovska. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* Харків. 2017. В. 2. № 10(86). С. 20–24.

[5] Гачак Ю.Р. Застосування рослинної біодобавки в технології плавлених сирів / Ю.Р. Гачак, О.Р. Михайлицька. *Збірник матеріалів наукової конференції «Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека».* Київ : НУХТ, 2014. С. 31–32.

[6] Гойко І., Пришепа М. Застосування кропу, черемші, базиліку у виробництві кисломолочного сиру. *Збірник міжнародної науково-практичної конференції «Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки, технології, якість та безпека».* Київ : НУХТ, 2014. С. 15–16.

Актуальність використання лікарських рослин, в число яких входить і буряк у формі кріопорошку, значно зросла останніми роками. Використання продукції кріогенних технологій дозволяє ефективно переробити рослину, зберігши найбільш можливу кількість біологічно активних речовин у природному співвідношенні. При цьому їх концентрація збільшується і у десятки разів підвищується рівень засвоєння організмом[7,8].

Максимально-корисної дії молочних продуктів на організм можна досягти, використовуючи ці біодобавки як наповнювачі, в тому числі і з метою лікування та профілактики шкідливої дії негативних факторів середовища[9]. В цьому плані використання кріопорошків як біодобавок до «молочної» основи, вміле їх поєднання несе у собі великі перспективи як у соціальному, так і біолого-технологічному плані[10,11].

Враховуючи вищенаведене, вивчення впливу застосування нового вітчизняного кріопорошку «Буряк» в технології солодкого та соленого плавлених сирів видається нам перспективним напрямом досліджень не лише з погляду створення нових вітчизняних молочних продуктів лікувально-профілактичного спрямування, але й розширення традиційного асортименту молокопереробних підприємств, що виробляють аналогічну продукцію нового покоління.

---

[7] Kaminarides, S. Effect of added milk and cream on the physicochemical, rheological and volatile compounds of Greek whey cheeses / S. Kaminarides, K. Nestoratos, T. Massouras. *Small Ruminant Research*. Volume 113, Issues 2–3, July 2013, Pages 446–453. URL: https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.04.009.

[8] Turchyn I., Zalensky, M., Voychishin, A. Development of technology of cereal past with combined composition. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies.* 2018. Vol. 20, № 85. P. 24–28.

[9] Беницька А.А., Осечко В.І., Гачак Ю.Р. Спеції в якості фітодобавок у технології молочних продуктів ЛПС. *Матеріали міжнародної студентського наукової конференції ЛНУВМ БТ імені С.З. Гжицького*. 2016. Ч. 3. С. 89–90.

[10] Бойчак Я., Кобернюк В., Петрик Л. Нові види і форми біодобавок в технології молочних продуктів ЛПН. *Дні студентської науки у ЛНУВМ та БТ імені С.З. Гжицького: Матеріали студентської конференції.* Львів, 2018. С. 79–80.

[11] Савченкова Л.В., Акімова М.С. Вивчення токсичності кріоподрібненого порошку аронії чорноплідної. *Аспекти розвитку фармацевтичних та медичних досліджень на сучасному етапі: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*, м. Луганськ, 27–28 березня 2014 р. С. 105.

1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Як відзначають численні дослідники, останніми роками новітні технології молочних функціональних продуктів передусім повинні бути спрямовані на збереження корисних речовин молока, оскільки молоко є природним функціональним продуктом[12,13,14]. В той же час стрімко зростає роль наповнювачів під час виробництва молочної продукції. Суспільство невпинно вимагає вдосконалення наявних та створення щораз нових технологій продуктів, в тому числі і плавлених сирів із їхнім нормативним чисельним складом пропонованих наповнювачів[15,16]. Важливе завдання наповнювачів – це підвищення біологічної, харчової та технічної якості, а також цінність виготовлюваних продуктів[17,18].

На цей час перевагу мають ті продукти, які здатні очищати організм від радіонуклідів, важких металів, шлаків, забезпечують його нормальне функціонування та підвищують резистентність до

---

[12] Ha, M. In-Depth Characterization of Sheep (Ovis aries) Milk Whey Proteome and Comparison with Cow (Bos taurus) / M. Ha, M. Sabherwal, E. Duncan, S. Stevens, P. Stockwell, M. McConnell, A. El-Din Bekhit, A. Carne. *PLoS ONE.* 2015. Vol. 10. Issues 10. e0139774 DOI 10.1371/journal.pone.0139774.

[13] Horyuk Yu.V. Kukhtyn M.D., Perkiy Yu.B., Horyuk V.V., Semenyuk, V.I. Identification of Enterococcus isolated from raw milk and cottage cheese “home” production and study of their sensitivity to antibiotics. *Scientific Messenger LNUVMBT named after S.Z. Gzhytskyj.* 2016. Vol. 18, № 3(70). P. 44–48.

[14] Nagovska V., Hachak Y., Gutyj B., Bilyk O., Slyvka N. Influence of wheat bran on quality indicators of a sour milk beverage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2018. Vol. 4, Issue 11 (94). P. 28–34.

[15] Samilyk M. Improving the technology of soft sour milk cheese by increasing biological value. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. 2017. Vol. 19, № 80. P. 33–37.

[16] Сливка Н.Б. Нова рецептура плавлених сирів із ехінацеєю та страв з нього. *Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції мол. вчених і студентів «Актуальні питання розвитку харчових в-в, ресторанного г-ва і торгівлі».* Харків. 2010. С. 27–89.

[17] Пуківський П., Турчин І., Сливка Н., Михайлицька О. Використання рослинної сировини в технології сиркових мас. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького.* 2015. Т. 17, № 4. С. 105–109.

[18] Украинец А.И., Рашевская Т.А., Вашека О.Н. Морфология кристаллических элементов наноструктуры сливочного масла с крио-порошками растительными пищевыми. *Кинетика и механизм кристаллизации. Кристаллизация для нанотехнологий, техники и медицины : V междунар. науч. конф.,* 23-26 сент. 2008 г. : тезисы докл. Иваново (Россия), 2008. С. 190.

несприятливих факторів навколишнього середовища споживачів[19,20].

Дуже перспективним є збагачення молочних продуктів вітамінами та мінеральними речовинами за рахунок додавання до них рослинних біодобавок у різних агрегатних станах. Створюються нові продукти, чи так звані комбіновані, – лікувально-профілактичні продукти[21].

Основними методологічними підходами до формування функціональних продуктів є: [22]

– технологічна сумісність дієтичних добавок з основними компонентами харчових систем;

– збереження біологічної активності добавок під час кулінарного обробітку і зберігання;

– поліпшення якості продукції за рахунок введення в рецептуру добавок;

– формування фізіологічної цінності продукту функціонального харчування;

– ідентифікація дієтичних добавок з визначеною біологічною активністю;

– медико-біологічна оцінка кулінарних продуктів для функціонального харчування.

Основним принципом створення функціональних продуктів можна вважати зміцнення здоров'я людини шляхом впливу на визначені фізіологічні реакції організму[23].

Останніми роками на арену біодобавок активно виходять численні кріодобавки. Так, А.О. Пащенко (2016) запропонувала використовувати кріопорошок «Гарбуз» для промислового

---

[19] Sadowska-Rociek, A., Mickowska B., Cieślik E. Assessment of nutrient content in selected dairy products for compliance with the nutrient content claims. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2013; 2(Special issue):1891–1897

[20] Савченкова Л.В., Немятих О.Д., Тернинко І.І., Рокотянська В.В., Акімова М.С., Бурцева О.М., Кулдиркаєва Є.В. Лікарські рослини як джерело створення нових лікарських засобів / Луганськ : СПД Рєзнік В.С., 2012. 64 с

[21] Мазараки А.А. Технологія продуктів функціонального призначення. / А.А. Мазараки, М.І. Пересічний, М.Ф. Кравченко. Київ : Київ. нац. торг.-екон. університет. 2012. 116 с.

[22] Сирохман І.В., Загородня В.М. Товарознавство продуктів функціонального призначення / навч. посібник для студентів ВНЗ. Київ, 2009. 544 с.

[23] Грек О.В., Скорченко Т.А. Технологія комбінованих продуктів на молочній основі : Підручник / НУХТ. Київ, 2012. 362 с.

виробництва солодких та солених сиркових мас лікувально-профілактичного напряму.

Н.І. Тицейко (2016) розробила для промислового виробництва рецептури солених сиркових мас лікувально-профілактичного напряму із кріопорошками «Морська капуста» та «Брокколі».[24]

А. Ільїнська і співавтори (2017) рекомендують використання кріопорошків «Гарбуз», «Амарант», «Брокколі» та «Морська капуста» як біодобавок до «молочної основи» кисломолочного сиру, а також плавленого сиру «Домашній». О. Грабарчук, А. Ільїнська, В. Кобернюк (2018) пропонують використання кріопорошків у технології молочних продуктів лікувально-профілактичного напряму[25].

Ю. Лісовська, О. Пунейко (2018) розробили промислові рецептури молочних продуктів лікувально-профілактичного напряму з кріопорошком із морепродуктів[26].

І такі дослідження активно продовжуються та розширюються досі.

Враховуючи вищенаведене, використання кріопорошків, в тому числі і пропонованого нами кріопорошку «Буряк», як додаткових рецептурних складників в технології солодких і солених плавлених сирів є цікавим, оправданим, корисним для науки, з подальшим якнайшвидшим впровадженням у виробничий цикл молокопереробних підприємств України.

Традиційно буряк має широкий спектр застосування в народній медицині, завдяки своїм корисним і цілющим властивостям. Корисні властивості буряка зумовлені наявністю в коренеплодах різних вітамінів, бетаїну, мінеральних речовин, біофлавоноїдів. Вживається як загальнозміцнюючий продукт, що покращує травлення і обмін речовин. Кобальт, що міститься в буряку, допомагає організму синтезувати вітамін В12, а йод захищає щитовидну залозу, зберігає

---

[24] Гачак, Ю.Р. Застосування рослинної біодобавки в технології плавлених сирів / Ю.Р. Гачак,О.Р. Михайлицька. *Збірник матеріалів наукової конференції «Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека».* Київ : НУХТ, 2014. С. 31–32.

[25] Ільїнська А. Беницька А., Пристанський Р. Кріопорошки в якості біодобавок у молочних продуктах ЛПН. Актуальні задачі сучасних технологій 6 збірник тез доповідей н. т. конференції молодих учених та студентів. Тернопіль, 2017. С. 174–175.

[26] Лісовська Ю., Пунейко О. Розробка рецептур молочних продуктів ЛПН із кріопорошком із морепродуктів. *Дні студентської науки у ЛНУВМ та БТ імені С.З Гжицького: Матеріали студентської конференції.* Львів, 2018. С. 110–111.

пам'ять і працездатність. Дуже важливою речовиною, що містяться в буряку, є бетаїн, біологічно активна речовина, необхідна для повного засвоєння білка. Бетаїн настільки активний, що дозволяє засвоювати білки, що містяться в м'ясі, майже на 100%. Добре поліпшується робота печінки під дією бетаїну, що входить до складу буряків. Буряк містить значну кількість мінеральних сполук. Зокрема, всі біометали – натрій, калій, магній, кальцій, марганець, залізо, кобальт, мідь, цинк, молібден. Буряк містить численні вітаміни (з розрахунку на 100 грамів продукту): Вітамін А – 0.01 мг, Вітамін В1 – 0.02 мг, Вітамін В2 – 0.04 мг, Вітамін В3 – 0.1 мг, Вітамін В6 – 0.07 мг, Вітамін В9 – 13.0 мкг, Вітамін С – 10.0 мг, Вітамін Е – 0.1 мг, Вітамін РР – 0.2 мг[27].

Метою роботи була розробка нової технології солодких та солених сиркових мас з використанням кріопорошку «Буряк».

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити ряд завдань:

– обґрунтувати доцільність використання кріопорошку «Буряк» у технології соленого і солодкого плавленого сиру;

– дослідити органолептичні показники солодких та солених плавлених сирів із використанням кріопорошку «Буряк»;

– дослідити основні фізико-хімічні показники солодких та солених плавлених сирів із кріопорошком «Буряк».

2. Матеріал та методи досліджень

Планом наукових досліджень були передбачені експерименти в умовах наукової лабораторії кафедри технології молока і молочних продуктів Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького та на виробництві.

Для досліджень використовували кріопорошок «Буряк». Дози пропонованої фітодобавки розроблялись на основі рекомендованих добових норм споживання плавленого сиру для різних вікових груп, лікувально-профілактичних доз біодобавки. Сам кріопорошок вносили безпосередньо у сирну суміш перед плавленням.

В якості молочної прототипів нами використано:

1. Для сиру соленого плавленого із кріопорошком «Буряк» – рецептуру традиційного плавленого сиру «Російський».

2. Для сиру солодкого плавленого із кріопорошком «Буряк» – рецептуру солодкого плавленого сиру «Фруктовий».

---

[27] Мусульманова М.М. Комбинированные молочно-растительные продукты. *Молочная промышленность*. 2006. № 5. С. 72–73.

Першим етапом наукових досліджень було заплановано розробку рецептур нового плавленого сиру із кріопорошком «Буряк» на базі вказаних прототипів.

Компоненти суміші для плавлення попередньо готувались згідно з вимогами технологічних інструкцій під час виробництва плавлених сирів. Плавлення суміші здійснювали при температурі 80–82°С. Вибір та пошук доз складників проводився:

– за збереження максимально наближених нормативних характеристик плавленого сиру;

– забезпечення смакових характеристик плавленого сиру із додаванням пропонованої біодобавки.

Дослідження проб готової продукції здійснювали відповідно до ГОСТ 26809-86 «Молоко і молочні продукти. Правила приймання. Методи відбору і підготовка проб аналізу» та ДСТУ ISO 707-2002 «Молоко і молочні продукти. Настанови з відбирання проб»; ДСТУ ISO 5538:2004 «Молоко і молочні продукти. Відбирання проб. Контроль за якісними показниками»[28].

3. Результати досліджень та їх обговорення

3.1. Розробка рецептур плавленого сиру: (соленого та солодкого) із використанням кріопорошку «Буряк»

3.1.1. Сир плавлений солений із кріопорошком «Буряк»

Сир, вибраний нами як прототип – плавлений сир «Російський», належить до плавлених сирів «Сири плавлені скибкові». Плавлені сири цієї групи характеризуються певним складом жиру у сухій речовині, вмістом вологи, кухонної солі, мають певну величину pH і свої органолептичні характеристики, що відрізняють їх у технологічній та товарознавчій характеристиці цього виду продукції.

Під час підбору рецептурних складників для соленого плавленого сиру за основу нами було вибрано базову рецептуру плавленого сиру «Російський».

У результаті проведених досліджень та численних дегустацій було відібрано оптимальну, на наш погляд, рецептуру (табл. 1), де

[28] Samilyk M. Improving the technology of soft sour milk cheese by increasing biological value. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. 2017. Vol. 19, № 80. P. 33–37.

незначну частину самого сухого знежиреного молока (30,6 проти 33,6 на 1 000 кг готового продукту) у дослідному зразку було замінено на пропонований кріопорошок «Буряк». Кількість внесення пропонованого кріопорошку «Буряк» визначили органолептичні властивості дослідних зразків, їх відповідність традиційній продукції – соленому плавленому сиру – «прототипу».

Таблиця 1

Рекомендовані рецептури плавленого сиру «Російський» та сир солений з кріопорошком «Буряк»

№	Сировина	Сир плавлений	
		«Російський»	Із кріопорошком «Буряк»
1	Сир «Російський»	380,0	380,0
2	Сир «Голландський»	385,0	385,0
3	Молоко коров'яче сухе знежирене (мч СР 96%)	33,6	29,6
4	Суміш триполіфосфат натрію (мч СР 20%)	102,0	102,0
5	Масло «Селянське» (мч СР 75% , мчж 72,5%)	33,4	33,4
6	Вода питна	102,8	102,8
7	Кріопорошок «Буряк»	-	4,0
8	Всього	1020	1020
9	Вихід	1000	1000

У розробленому нами та пропонованому виробництву соленому плавленому сирі (табл. 1.) складники запропоновано у таких кількостях (із розрахунку на 1 000 кг готового продукту): сир сичужний дрібний «Голландський» – 385,0 кг; сир сичужний дрібний «Російський» – 380,0 кг молоко коров'яче сухе знежирене з МЧ СР 96% – 29,6 кг; масло «Селянське» – 33,4 кг ; натрій фосфорнокислий (20% р-н) – 102,8 кг; вода питна – 102,8 кг та кріопорошок «Буряк» – 4,0 кг.

Як засвідчили результати дегустаційної оцінки численних дослідних зразків, саме ця рецептура і отримала найкращу органолептичну оцінку.

3.1.2. Сир плавлений солодкий із кріопорошком «Буряк»

Сир, вибраний нами як прототип плавленого сиру належить до плавлених сирів «Сири плавлені солодкі». Плавлені сири цієї групи

характеризуються також певним складом жиру у сухій речовині, вмістом вологи, кухонної солі, мають певну величину pH і свої органолептичні характеристики, що відрізняють їх у технологічній та товарознавчій характеристиці даного виду продукції.

Під час підбору рецептурних складників для солодкого плавленого сиру за основу нами було вибрано базову рецептуру плавленого сиру «Фруктовий», у склад якого, поряд з сичужним сиром «Голландський», нормативними вимогами передбачено додавання сухого знежиреного молока, масла селянського, солі-плавителя (триполіфосфату натрію), кисломолочного сиру нежирного та напівжирного, фруктової есенції та води питної.

У результаті проведених досліджень та численних дегустацій було відібрано оптимальну, на наш погляд, рецептуру (табл. 2). Незначну частину самого сухого знежиреного молока в процесі наукового пошуку у дослідному зразку було замінено на пропонований кріопорошок «Буряк». Кількість внесення кріопорошку визначили органолептичні властивості дослідних зразків, їх відповідність традиційній продукції – солодкому плавленому сиру – прототипу «Фруктовий».

Таблиця 2

Рекомендовані рецептури плавленого сиру «Фруктовий» та із кріопорошком «Буряк»

№	Сировина під час виготовлення плавленого сиру традиційного та із кріопорошком «Буряк»	Сир плавлений	
		«Фруктовий» традиційний	із кріопорошком «Буряк»
1.	Сир сичужний дрібний «Голландський»	82,4	82,4
2.	Сир кисломолочний нежирний	114,5	114,5
3.	Сир кисломолочний напівжирний 9%	144,2	144,2
4.	Молоко коров'яче сухе знежирене з МЧ СР 96%	61,8	58,8
5.	Масло вершкове	213,5	213,5
6.	Есенція фруктова	1,0	-
7.	Натрій фосфорнокислий (20% р-н)	51,9	51,9
8.	Цукор пісок	257,5	257,5
8.	Вода питна	103,2	103,2
9.	Кріопорошок «Буряк»	-	3,0
10.	Всього	1000	1000

У результаті наших експериментів ми також намагалися максимально зберегти нормативні органолептичні характеристики та технологічні параметри молочної основи (плавленого сиру) та кріопорошку, знайти їх оптимальне співвідношення.

Під час підбору рецептурних складників для солодкого плавленого сиру відповідно сир «Фруктовий», у склад рецептури якого, поряд із сичужним сиром «Голландський», нормативними вимогами передбачено додавання сухого знежиреного молока, масла селянського, кисломолочного нежирного та напівжирного кисломолочного сирів, есенції фруктової, цукру, солі-плавителя (триполіфосфату натрію) та води питної.

Як основу нами вибрано відповідну рецептуру сиру «Фруктовий». Робота дегустаційної комісії дозволила вибрати оптимальну. За рецептурним складом пропонований нами дослідний плавлений сир вирізнявся певними змінами не лише у кількісному складі, але й усуненням із рецептури солодкої есенції та заміни незначної кількості сухого знежиреного молока пропонованим кріопорошком «Буряк», яка суттєво не впливала на формування органолептики, близької до органолептики прототипу – сиру плавленого «Фруктовий».

У запропонованому нами солодкому плавленому сирі складники запропоновано у таких кількостях (із розрахунку на 1 000 кг готового продукту): сир сичужний дрібний «Голландський» – 82,4 кг; сир кисломолочний нежирний – 114,5 кг; сир кисломолочний напівжирний 9% – 144,2 кг; молоко коров'яче сухе знежирене з МЧ СР 96% – 58,8 кг; масло вершкове – 213,5 кг; натрій фосфорнокислий (20% р-н) – 51,9 кг; цукор пісок – 257,5 кг; вода питна – 103,2 кг та кріопорошок «Буряк» – 3,0 кг (табл. 2).

Як засвідчили результати дегустаційної оцінки численних дослідних зразків, саме ця рецептура і отримала найкращу органолептичну оцінку.

3.2. Технологічні характеристики та бальна оцінка плавлених сирів із використанням кріопорошку «Буряк»

Згідно з нормативними вимогами щодо нової чи модифікованої продукції її оцінка та визначення технологічних якостей сиру є основним фактором для встановлення рівня цін для кожного продукту, дозволяє виявляти, а потім і ліквідувати можливі недоліки під час їх виготовлення.

Як відомо, повноцінна оцінка технологічної якості сиру забезпечується за рахунок використання прямих чи непрямих методів вимірювань за допомогою приладів. Як прямі методи можуть бути використані вимірювання харчових консистенцій чи аналіз складових елементів, що відповідають за формування аромату сиру. Під час проведення непрямих вимірювань дослідники звертаються до хімічних і ферментативних аспектів, використовуючи мікроскопію і різні фізичні методи досліджень.

Серед органолептичних характеристик особливе значення в оцінці якості продукції мають запах, смак, консистенція, колір сирних виробів. Важливе значення мають також товарний вигляд продукції – ступінь наповнення упаковки, щільність і правильність фасування, її зовнішній вигляд.

Додавання до рецептури кріопорошку «Буряк» привело певної зміни органолептики дослідних зразків пропонованих соленого та солодкого плавленого сиру (табл. 3, 4).

Таблиця 3

Органолептичні показники плавленого сиру «Російський» та соленого з кріопорошком «Буряк»

№	Назва показника	Традиційний плавлений «Російський»	Плавлений сир із кріопорошком «Буряк»
1	Смак і запах	Виражений сирний кислуватий	Ситний смак, злегка солений, сторонніх запаху і смаку не виявлено
2	Консистенція	Пластична, злегка пружна	В міру щільна, злегка пружна, наявний зовнішній блиск
3	Колір тіста	Від світло-жовтого до жовтого	Рожевий, однорідний по всій масі
4	Вид на розрізі	Відсутність рисунку, допускається наявність пустот	Відсутність рисунку та пустот
5	Зовнішній вигляд	Поверхня чиста, не підсохла, не запліснявіла	Поверхня чиста, не підсохла, блискуча

Аналіз органолептичних ознак соленого плавленого сиру із кріопорошком «Буряк», наведених у таблиці 3, вказує, що дослідні зразки сиру зберігають в міру щільну, злегка пружну консистенцію, наявний зовнішній блиск, мають характерний оригінальний смак і запах (ситний смак, злегка солений). Дослідні зразки зовні мали

скоринку, на розрізі – суцільну мазеподібну масу. Колір дослідних зразків був рожевий, однорідний по всій масі.

Зовнішня поверхня дослідних зразків (кружки, бруски) чиста, не підсохла, блискуча.

У наступній серії експериментів було проведено дослідження органолептики солодкого плавленого сиру із кріопорошком «Буряк».

Таблиця 4

Органолептичні показники солодкого плавленого сиру «Фруктовий» та солодкого з кріопорошком «Буряк»

№	Назва показника	Традиційний плавлений «Фруктовий»	Плавлений сир із кріопорошком «Буряк»
1	Смак і запах	Солодкий, злегка кислуватий із вираженим смаком і ароматом лимону, апельсину	Солодкий, сторонніх смаку та запаху не виявлено
2	Консистенція	Ніжна, пластична	Ніжна, пластична однорідна; зовні наявний блиск
3	Колір тіста	Зумовлений внесеним смаковим наповнювачем	Яскраво червоний, однорідний по всій масі
4	Вид на розрізі	Відсутність рисунку, допускається наявність пустот	Суцільна пружна маса, зверху наявна скоринка
5	Зовнішній вигляд	Поверхня чиста, не підсохла, не заплісняві́ла	Поверхня чиста, не підсохла, блискуча

Аналіз органолептичних ознак солодкого плавленого сиру із кріопорошком «Буряк», наведених у таблиці 4, вказує, що дослідні зразки сиру зберігають ніжну, пластичну консистенцію, наявний зовнішній блиск, мають характерний оригінальний смак і запах (солодкий, приємний, сторонніх запаху і смаку не виявлено). Дослідні зразки зовні мали тоненьку кірочку, на розрізі – суцільну мазеподібну масу. Колір дослідних зразків був яскраво червоний, однорідний по всій масі. Зовнішня поверхня дослідних зразків (кружки, бруски) чиста, не підсохла, блискуча.

У подальшому досліджували фізико-хімічні властивості традиційних прототипів сирів із додаванням біодобавки – кріопорошку «Буряк».

Як видно з таблиці 5, дослідні зразки сиру плавленого соленого фасувались у традиційні форми (батончики) та у форми кружків.

Маса дослідних зразків сиру була в межах 100 г. Так, масова частка жиру у сухій речовині складає у продукті – 45,6% (у традиційному – 45%). Представлені дослідні зразки сиру характеризувались зміненими величинами масової частки вологи – 45,4% проти 45,0; та солі – 2,4 проти 2,0% у контролі; а pH дослідних зразків плавленого сиру із кріопорошком відповідно складав 5,6, що відповідає нормативним вимогам.

Таблиця 5

Фізико-хімічні показники плавленого сиру «Російський» та соленого з кріопорошком «Буряк»

№	Назва сиру	Вміст, %			pH сиру	Форма і маса (г)
		жиру в сухій речовині	вологи, не менше	солі, не менше		
1	Нормативні вимоги, щодо плавленого сиру «Російський»	45	50	2,0	5,6-5,7	батон масою 100г
2	Сир плавлений з кріопорошком «Буряк»	45,6	45,4	2,4	5,6	батон масою 100 г кружки масою 100 г

Результати досліджень фізико-хімічних показників плавленого солодкого сиру наведені у таблиці 6.

Як видно, дослідні зразки сиру також фасувались як у традиційні форми (батончики), так і у форми кружків. Маса дослідних зразків сиру була в межах 100 г. В той же час масова частка жиру у сухій речовині складає у продукті – 30,4% (у традиційному – 30%). Представлені дослідні зразки сиру характеризувались зміненими величинами масової частки вологи – 27,6% та сахарози – 27,6% а pH дослідних зразків плавленого сиру із кріопорошком відповідно складав 5,6, що загалом відповідає нормативним вимогам.

Якими не були б фізико-хімічні характеристики нових чи модифікованих продуктів для потенційного споживача вкрай важливу роль відіграють візуальні та смакові характеристики продукції.

У зв’язку із цим проведення дегустаційної оцінки харчових продуктів, в тому числі і нових молочних, є необхідним.

Таблиця 6

Фізико-хімічні показники солодкого плавленого сиру «Фруктовий» та солодкого з кріопорошком «Буряк»

№	Назва сиру	Вміст, %			pH сиру	Форма і маса (г)
		жиру в сухій речовині	вологи, не менше	сахарози, не менше		
1	Сир плавлений традиційний солодкий «Фруктовий»	30,0	39	25	5,7	батон масою 100 г
2	Сир плавлений із кріопорошком «Буряк»	30,4	27,6	25,2	5,6	батон масою 100 г кружки масою 100 г

Таблиця 7

Результати дегустаційної оцінки соленого плавленого сиру «Російський» та соленого з кріопорошком «Буряк»

№	Назва показника плавленого сиру	кількість балів	Результати дегустації			
			традиційного солодкого плавленого сиру «Російський»		Плавленого сиру кріопорошком «Буряк»	
			скидка на вади	фактично балів	скидка на вади	фактично балів
1	Смак і запах	15	1	14	1	14
2	Консистенція	9	1	8	0	9
3	Колір тіста	2	0	2	1	1
4	Вид на розрізі	2	0	2	0	2
5	Зовнішній вид	2	0	1	1	2
6	Всього	30	2	27	3	28

Таблиця 8

Результати дегустаційної оцінки плавленого сиру «Фруктовий» та солодкого з кріопорошком «Буряк»

№	Назва показника плавленого сиру	Кількість балів	Результати дегустації			
			плавленого сиру «Фруктовий»		сир із кріопорошком «Буряк»	
			скидка на вади	Фактично балів	скидка на вади	Фактично балів
1	Смак і запах	15	1	14	1	14
2	Консистенція	9	0	9	0	9
3	Колір тіста	2	0	2	0	2
4	Вид на розрізі	2	0	2	0	2
5	Зовнішній вид	2	0	1	1	1
6	Всього	30	1	29	2	28

Проведена нами дегустаційна оцінка зразків плавленого сиру солодкого та соленого різної жирності із додаванням кріопорошку «Буряк» засвідчила відповідно по 28 балів для кожного з 30 балів можливих, що свідчить про нормативну відповідність товарознавчих характеристик (табл. 7 та 8).

3.3. Оцінка біологічної цінності плавлених сирів із використанням кріопорошку «Буряк»

Оцінка біологічної цінності нових чи модифікованих харчових продуктів оцінюється за вмістом біологічно активних речовин, в тому числі вітамінів.

Додавання до складу плавлених сирів кріопорошку «Буряк» не лише надає продукції належного товарного вигляду та привабливого кольору, але й підвищує у них вміст вітамінів (табл. 9, 10).

Таблиця 9

Вміст вітамінів у плавленому сирі «Російський» та соленому з кріопорошком «Буряк»

№ п/п	Назва продукту	Вміст вітамінів, мг/100г продукту				
		ß-каротин	В1	В2	РР	С
1.	Сири плавлені (нормативні вимоги)	0,08	0,02	0,39	0,15	1,2
2.	Сир плавлений «Російський»	0,09	0,02	0,36	0,14	1,3
3.	Сир плавлений з кріопорошком «Буряк»	0,14	0,04	0,44	0,18	1,9

Таблиця 10

Вміст вітамінів у плавленому сирі «Фруктовий» та солодкому з кріопорошком «Буряк»

№ п/п	Назва продукту	Вміст вітамінів, мг/100г продукту				
		ß-каротин	В1	В2	РР	С
1.	Сири плавлені (нормативні вимоги)	0,08	0,02	0,39	0,15	1,2
2.	Сир плавлений традиційний солодкий «Фруктовий»	0,10	0,03	0,41	0,16	1,4
3.	Сир плавлений солодкий із кріопорошком «Буряк»	0,12	0,04	0,42	0,16	1,5

У вищенаведених таблицях наведено вітамінний склад у плавлених сирах традиційного виробництва та прототипах із зміненою рецептурою шляхом збагачення кріопорошком «Буряк».

Як видно із цифрового матеріалу, дослідні зразки плавленого сиру із кріопорошком мали підвищені порівняно із традиційними сирами величини нормативно передбачених вітамінів. Аналіз табличних даних засвідчив більший приріст нормативно-передбачених вітамінів у соленому плавленому сирі із кріопорошком порівняно із плавленим солодким сиром. Це, на нашу думку, пов’язано із більшою рецептурною кількістю самого кріопорошку. Слід зазначити, що кріотехнологія забезпечує зберігання природних вітамінів у кріопорошках.

3.4. Показники безпеки плавлених сирів із використанням кріопорошку «Буряк»

Згідно з вимогами нормативних вимог до показників безпеки харчових продуктів обов’язково відносять дослідження вмісту токсичних елементів та мікробіологічні дослідження. У зв’язку з цим нами були проведені дослідження вмісту важких металів у всіх зразках плавленого сиру солодкого та соленого.

У таблицях 11 та 12 наведені результати досліджень вмісту важких металів у дослідних зразках плавленого сиру традиційного – прототипу та відповідного із кріопорошком «Буряк».

Таблиця 11

Вміст важких металів у зразках плавленого сиру «Російський» та соленого з кріопорошком «Буряк»

№	Досліджуванi зразки	Вміст важких металів у плавлених сирах (мг/кг)						
		Свинець за ГОСТ 26931	Кадмій за ГОСТ 929333	Миш'як за ГОСТ 26986	Ртуть за ГОСТ 26927	Мідь за ГОСТ 26931	Цинк за ГОСТ 2993486	Залізо за ГОСТ 26933
1.	Нормативні вимоги по плавлених сирах	0,3	0,2	0,2	0,02	4,0	5,0	-
2.	Сир плавлений традиційний	0,24	0,07	-	-	2,7	3,8	-
3.	Сир плавлений із кріопорошком «Буряк»	0,22	0,06	-	-	2,7	3,8	-

Таблиця 12

Вміст важких металів у зразках солодкого плавленого сиру «Фруктовий» та з кріопорошком «Буряк»

№	Досліджувані зразки	Вміст важких металів у плавлених сирах (мг/кг)						
		Свинець за ГОСТ 26931	Кадмій за ГОСТ 929333	Миш'як за ГОСТ 26986	Ртуть за ГОСТ 26927	Мідь за ГОСТ 26931	Цинк за ГОСТ 2993486	Залізо за ГОСТ 26933
1.	Нормативні вимоги по плавлених сирах	0,3	0,2	0,2	0,02	4,0	5,0	-
2.	Сир плавлений традиційний солодкий «Фруктовий»	0,20	0,05	-	-	2,7	3,6	-
3.	Сир плавлений із кріопорошком «Буряк»	0,18	0,04	-	-	2,4	3,6	-

Аналіз цифрового матеріалу показав, що у всіх дослідних зразках сиру плавленого як традиційного виробництва, так і аналогічних із кріопорошком «Буряк» концентрація таких важких металів, як свинець, кадмій, миш'як та ртуть, була на 2–3 порядки нижче від гранично допустимих величин. У той же час виявлена аналогічна тенденція щодо більш високих кількостей мінеральних елементів у солених зразках плавленого сиру порівняно із солодким плавленим сиром із кріопорошком, де кількість останнього у рецептурі є дещо меншою.

Не менш важливими показниками безпеки харчових продуктів є мікробіологічний контроль готової продукції. В Україні для організації та проведення мікробіологічного контролю керуються настановами, викладеними в нормативній документації на сировину та готову продукцію, санітарними правилами, інструкціями з миття та дезінфекції обладнання, а також інструкцією з мікробіологічного контролю виробництва на підприємствах молочної промисловості.

У виробництві плавлених сирів використовуються функціонально необхідні інгредієнти (ферментні препарати, закваски або заквашувальні препарати, солі-плавителі, сіль, цукор тощо); харчові добавки (загущувачі, стабілізатори, емульгатори, ароматизатори, барвники, консерванти тощо), наповнювачі (фрукти, овочі, спеції, зелень, горіхи тощо) та різні немолочні компоненти (рослинні жири, немолочні білки, м'ясні продукти тощо). Усі види та групи допоміжної сировини та компонентів повинні відповідати вимогам чинних нормативних документів на ці продукти.

Під час оцінки отриманих даних встановлено, що як традиційна продукція, так і дослідні зразки мали належні мікробіологічні показники, що позитивно характеризує як «культуру» технологічного процесу, так і самі продукти. В той же час шкідливої та небезпечної мікрофлори виявлено не було. Слід зазначити, що консервуюча дія інгредієнтів солі та цукру була дещо різною – сильнішою у разі застосування солі .

Таким чином, на основі проведених досліджень можна відзначити, що використання як сировини для виробництва плавленого сиру солодкого та соленого із використанням кріопорошку «Буряк» на основі плавленого сиру «Російський» та «Фруктовий» є виправданим, а отримана продукція є біологічно цінною, має належні товарознавчі характеристики, показники безпеки і розширює асортимент вітчизняної молочної продукції лікувально-профілактичного спрямування в Україні.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано доцільність використання кріопорошку «Буряк» в технології солодкого та соленого плавленого сиру.

2. Запропонована біодобавка кріопорошок «Буряк» є стандартною кріодобавкою, що не потребує суттєвого ускладнення технологічного процесу виготовлення плавленого соленого та солодкого сиру лікувально-профілактичного спрямування.

3. Розроблено виробничі рецептури соленого та солодкого плавленого сиру із використанням кріопорошку «Буряк».

4. Досліджено органолептичні, технологічні, біологічні властивості та показники безпеки дослідних зразків плавленого соленого та солодкого сиру із використанням кріопорошку «Буряк». Встановлено поліпшення якісних показників дослідних зразків порівняно з традиційними зразками. Плавлені сири за умов застосування кріопорошку «Буряк» мали приємний товарний вигляд.

5. Дослідні зразки плавленого сиру із кріопорошком мали підвищені порівняно із традиційними сирами величини нормативно передбачених вітамінів. Виявлені зміни у величинах вітамінів свідчать про підвищення біологічної цінності продукції та відповідності нормативних вимог.

АНОТАЦІЯ

Останніми роками перспективним є збагачення молочних продуктів вітамінами та мінеральними речовинами шляхом додавання до них рослинних біодобавок у різних агрегатних станах. Саме тому метою роботи була розробка нової технології солодких та солених сиркових мас з використанням кріопорошку «Буряк». Дози пропонованої фітодобавки розроблялись на основі рекомендованих добових норм споживання плавленого сиру для різних вікових груп та лікувально-профілактичних доз біодобавки. Сам кріопорошок вносили безпосередньо у сирну суміш перед плавленням. На основі проведених досліджень обґрунтовано доцільність використання кріопорошку «Буряк» у технології солодкого та соленого плавленого сиру. Досліджено органолептичні, технологічні, біологічні властивості та показники безпеки дослідних зразків плавленого соленого та солодкого сиру із використанням кріопорошку «Буряк». Встановлено поліпшення якісних показників дослідних зразків порівняно з традиційними зразками. Плавлені сири за умов застосування кріопорошку «Буряк» мали приємний товарний вигляд, а також високий вміст вітамінів. Виявлені зміни у величинах вітамінів вказують на підвищення біологічної цінності продукції та відповідність нормативним вимогам.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bilyk, O. Substantiation of the method of protein extraction from sheep and cow whey for producing the cheese «Urda» / O. Bilyk, N. Slyvka, B. Gutyj, H. Dronyk, O. Sukhorska. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Харків. 2017. В. 3. № 11(87). С. 18–22.

2. Gutyj B. The elaboration of cheese masses of therapeutic and prophylactic direction with cryoadditive "Pumpkin" / B. Gutyj, Y. Hachak, J. Vavrysevych, V. Nagovska. *"EUREKA: Life Sciences"*. 2017. № 1, 19–26.

3. Gutyj, B. The influence of cryopowder "Garbuz" on the technology of curds of different fat content / B. Gutyj, Y. Hachak, J. Vavrysevych, V. Nagovska. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Харків. 2017. В. 2. № 10(86). С. 20–24

4. Ha, M. In-Depth Characterization of Sheep (Ovis aries) Milk Whey Proteome and Comparison with Cow (Bos taurus) / M. Ha, M. Sabherwal, E. Duncan, S. Stevens, P. Stockwell, M. McConnell, A. El-Din Bekhit, A. Carne. *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10. Issues 10. e0139774 DOI 10.1371/journal.pone.0139774.

5. Horyuk Yu.V. Kukhtyn M.D., Perkiy Yu.B., Horyuk V.V., Semenyuk, V.I. Identification of Enterococcus isolated from raw milk and cottage cheese "home" production and study of their sensitivity to antibiotics. *Scientific Messenger LNUVMBT named after S.Z. Gzhytskyj*. 2016. Vol. 18, № 3(70). P. 44–48.

6. Kaminarides, S. Effect of added milk and cream on the physicochemical, rheological and volatile compounds of Greek whey cheeses / S. Kaminarides, K. Nestoratos, T. Massouras. *Small Ruminant Research*. Volume 113, Issues 2–3, July 2013, Pages 446–453. DOI https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.04.009.

7. Nagovska V., Hachak Y., Gutyj B., Bilyk O., Slyvka N. Influence of wheat bran on quality indicators of a sour milk beverage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4, Issue 11 (94). P. 28–34.

8. Sadowska-Rociek, A. Assessment of nutrient content in selected dairy products for compliance with the nutrient content claims / A. Sadowska-Rociek, B. Mickowska, E. Cieślik. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2013; 2(Special issue):1891–1897

9. Samilyk M. Improving the technology of soft sour milk cheese by increasing biological value. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. 2017. Vol. 19, № 80. P. 33–37.

10. Turchyn I., Zalensky, M., Voychishin, A. Development of technology of cereal past with combined composition. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies.* 2018. Vol. 20, № 85. P. 24–28.

11. Беницька А.а., Осечко в.І., Гачак Ю.Р. Спеції в якості фітодобавок у технології молочних продуктів ЛПС. *Матеріали міжнародної студентського наукової конференції ЛНУВМ БТ імені С. з. Гжицького.* 2016. Ч. 3. С. 89–90.

12. Бойчак Я. Кобернюк В., Петрик Л. Нові види і форми біодобавок в технології молочних продуктів ЛПН. *Дні студентської науки у ЛНУВМ та БТ імені С.З. Гжицького: Матеріали студентської конференції.* Львів, 2018. С. 79–80.

13. Гачак Ю.Р., Михайлицька О.Р. Застосування рослинної біодобавки в технології плавлених сирів. *Збірник матеріалів наукової конференції «Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека».* Київ : НУХТ, 2014. С. 31–32.

14. Гойко І., Пришепа М. Застосування кропу, черемші, базиліку у виробництві кисломолочного сиру. *Збірник міжнародної науково-практичної конференції «Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки, технології, якість та безпека».* Київ : НУХТ, 2014. С. 15–16.

15. Грек О.В., Скорченко Т.а. Технологія комбінованих продуктів на молочній основі : підручник / НУХТ. Київ, 2012. 362 с.

16. Ільїнська А., Беницька А., Пристанський Р. Кріопорошки в якості біодобавок у молочних продуктах ЛПН. *Актуальні задачі сучасних технологій : збірник тез доповідей н. т. конференції молодих учених та студентів.* Тернопіль, 2017. С. 174–175.

17. Мазараки А.А., Пересічний М.і., Кравченко М.Ф. Технологія продуктів функціонального призначення. Київ, Київ. нац. торг.-екон. університет. 2012. 116 с.

18. Мусульманова М.М. Комбинированные молочно-растительные продукты. *Молочная промышленность.* 2006. № 5. С. 72–73.

19. Пуківський П., Турчин І., Сливка Н., Михайлицька О. Використання рослинної сировини в технології сиркових мас. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького.* 2015. Т. 17, № 4. С. 105–109.

20. Савченкова Л.В. Немятих О.Д., Тернинко І.І., Рокотянська В.В., Акімова М.С., Бурцева О.М., Кулдиркаєва Є.В. Лікарські рослини як джерело створення нових лікарських засобів / Луганськ : СПД Рєзнік В.С., 2012. 64 с.

21. Савченкова Л.В., Акімова М.С. Вивчення токсичності кріоподрібненого порошку аронії чорноплідної. *Аспекти розвитку фармацевтичних та медичних досліджень на сучасному етапі: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*, м. Луганськ, 27–28 березня 2014 р. С. 105.

22. Сирохман І.В., Загородня в.М. Товарознавство продуктів функціонального призначення : навч. посібник для студентів ВНЗ. Київ, 2009. 544 с.

23. Сливка Н.Б. Нова рецептура плавлених сирів із ехінацеєю та страв з нього. *Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції мол. вчених і студентів «Актуальні питання розвитку харчових в-в, ресторанного г-ва і торгівлі».* Харків. 2010. С. 27–89.

24. Сязин И.Е., Касьянов Г.И. Техника и технология криообработки пищевого сырья: монография. Часть I. Краснодар : Экоинвест, 2011. 157 с.

25. Украинец А.И., Рашевская Т.А., Вашека О.Н. Морфология кристаллических элементов наноструктуры сливочного масла с криопорошками растительными пищевыми. Кинетика и механизм кристаллизации. Кристаллизация для нанотехнологий, техники и медицины : V междунар. науч. конф., 23-26 сент. 2008 г.: тезисы докл. Иваново (Россия), 2008. С. 190.

26. Лісовська Ю., Пунейко О. Розробка рецептур молочних продуктів ЛПН із кріопорошком із морепродуктів. *Дні студентської науки у ЛНУВМ та БТ імені С.З. Гжицького : Матеріали студентської конференції.* Львів, 2018. С. 110–111.

Information about authors:
Hachak Yu. R.,
Candidate of Biological Sciences,
Associate Professor at the Department
of Technology of Milk and Milk Products
Stepan Gzhytskyi National University
of Veterinary Medicine and Biotechologies Lviv
50, Pekarska str., Lviv, 79010, Ukraine

Gutyj B. V.,
Doctor of Veterinary Science,
Professor at the Department of Pharmacology and Toxicology
Stepan Gzhytskyi National University
of Veterinary Medicine and Biotechologies Lviv
50, Pekarska str., Lviv, 79010, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.6

ELECTRIC INSULATION TECHNOLOGIES AND CHARACTERISTICS OF MICRO-ARC OXIDATION OF ALUMINUM ALLOYS OF DIAMOND GRINDING WHEEL WRAMEWORKS[1]

Gutsalenko Yu. G.

INTRODUCTION

Microarc oxidation (MAO), also plasma electrolyte oxidation (PEO) in European terminological practice, used to modify surfaces of valve metals has recently gained a new impetus. The successful use of the MAO coatings in many industries is based on their high functional and performance characteristics determined by their unique physical and mechanical properties, with a sufficiently wide thickness range (from several to hundreds of micrometers) and high adhesion with a base[2].

MAO technology is a promising surface finishing process that allows you to obtain a wide range of coatings with various properties according to the requirements of their use[3].

In combination with other methods, namely, electric arc deposition[4] and extraction-pyrolytic decomposition[5], it allows the creation of polyfunctional (antiware, heat- and corrosion-resistant, dielectric, catalytic, etc.) coatings for the surfaces of nonvalve metals. The employment of slurry electrolytes in this method widens the scope of its application to novel fields, in medicine and biology in particular[6].

---

[1] The author is grateful to colleagues for discussing of research planning and results, as well as assistance in their implementation: V. V. Belozerov and A. I. Makhatilova (MDO in the AFM mode and X-ray diffraction analysis), E. K. Sevidova and I. I. Stepanova (MAO in the GS mode), L. I. Pupan (electron microscopy).

[2] Mikheev, A.E., Terekhin, N.A., Statsura, V.V. et al. *Bulletin of Machine Building*. 2, 56-63 (2003).

[3] Famiyeh, L., Xiaohu, H. *Mod. Concept Material Sci.* **2** (1), 000526 (2019).

[4] Student, M.M., Posuvailo, V.M., Veselivs'ka, H.H. et al. Mater. Sci. 53 (6), 789-795 (2018).

[5] Rudnev, V.S., Medkov, M.A., Yarovaya, T.P. et al. *Journal of Applied Chemistry* 85 (4), 621-628 (2012).

[6] Borisov, A.M., Krit, B.L., Lyudin, V.B. et al. Surf. Eng. Appl. Electrochem. 52, 50-78 (2016).

Despite the extensive experience in the use of MAO coatings and the development of numerical modifications of the method[7], in recent years the technology has become intensively developed due to the widespread use of light metals and alloys (aluminum, titanium, magnesium) in different industrial sectors[8]. The need for providing stable characteristics of coatings – high hardness, low porosity, required tribological properties, corrosion resistance, wear resistance, thermal and electrical insulation parameters – has also increased[9]. Traditional MAO methods do not exhaust all possibilities, and there is a renewed interest in investigation to develop new prospects for the effective application of the coatings appear. Today's interest in investigating the dielectric properties of micro-arc oxide coatings on aluminum alloys is related to the instrumental application of such alloys in diamond grinding wrameworks, which require electrical protection in high-performance technologies with direct current feed to the treatment area[10].

The little information available on investigation of the dielectric properties of the coating prepared using MAO leads to the conclusion that their characteristic, namely ohmic resistance and dielectric strength, substantially depend on the metal grade and electrolysis conditions[11].

Optimization of the contributing factors that affect the MAO process is performed based on one or more key coating quality criteria, as defined by the operation conditions. These usually include wear resistance, corrosion resistance, dielectric properties, thermal resistance etc.

However, much less attention is devoted to the study of microgeometry in applied research, in particular, to roughness and surface morphology. In most cases, these characteristics are of minor importance for the quality evaluation of MAO layers, except decorative coatings. The significance of the above characteristics is even more offset when the process involves removing the poorly adhered outer layer, which contributes to coating roughness increase.

---

[7] Suminov, I.V., Belkin, P.N., Apelfeld, A.V. et al. *Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys*: Book 2. Technosphera, Moscow (2011).

[8] Walsh, F.C., Low, C.T.J., Wood, R.J.K. et al. *Trans. Inst. Metal Finish.* 87 (3), 122-135 (2009).

[9] Filyak, M.M., Kanygina, O.N. *Bulletin of the Orenburg State University*. 9 (158), 240-243 (2013).

[10] Gutsalenko, Yu.G., Sevidova, O.K. *Reliability of instrument and optimization of technological systems*. 40, 35-43 (2017).

[11] Tokarev, A.V. Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University 12 (10), 106-110.

At the same time, certain applications of MAO coatings require considering the surface roughness and morphology of the produced surfaces, besides their key functional properties. The combination of the microgeometry (predominantly, mean profile deviation R_a, which is the most informative roughness indicator) and surface morphology characteristics allows to create complementary surface quality evaluation systems for many practical applications of MAO coatings.

Feasibility study of using MAO layers as electrical insulation (dielectric) coatings on metal wrameworks of diamond grinding wheels[12] demonstrated that their bore surface R_a roughness index must meet specific requirements and be equal to 2.5 μm, according to the drawings. Similar requirements can be also applied to other parts with rigid joint connections.

At the same time, the connection between porosity as a structural component of the surface of coatings with their dielectric properties[13] which are decisive when used in a diamond-abrasive tool with direct current to it in combined electrophysical grinding processes is extremely poorly understood[14].

The purpose of this work to study MAO technology capabilities as applied to deformable aluminum alloys and evaluate the dielectric properties of the resulting coatings, influence of factors on the roughness and morphology of the surface of dielectric coatings and to determine the rational conditions of their formation.

1. Organization of experiments and research

The experimental samples were made of deformable aluminum alloys D16T (1360) and AK6 (2124) GOST 4784-97 (ISO 209-1) which are used for the manufacturing of the diamond grinding wheels wrameworks.

The dimensions of the samples are 20x15x1.5 mm (D16T – sheet hire) and ∅30 mm, 5 mm thick (AK6 – calibrated bar). The initial surface roughness amounted to from R_a = 1.2 μm (on samples from AK6) to R_a = 1.6 μm (on samples from D16T).

---

[12] Sevidova, E., Gutsalenko, Yu., Rudnev, A. et al. *LNME:* Advances in Design, Simulation and Manufacturing II: DSMIE 2019 Conf. Proc., 302-310 (2020)

[13] Gutsalenko, Yu.G., Sevidova, E.K., Stepanova, I.I. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 55 (5), 602-606 (2019).

[14] Gutsalenko, Yu.G. *Diamond-spark grinding of high functionality materials.* Cursor, Kharkov (2016).

The coatings were formed in indentical conditions in the three samples. The data were registered by measuring the respective parameters in five points for the different sides of of each sample. The error of the measurtment results did not exceed 10%.

Two electric modes of MAO most widely employed in the modern technology, namely an anode galvanostatic (GS) one and a mode of auto-falling power (AFP) using an anode-cathode (alternating) current, were investigated. The processes were accomplished using transformer and capacitor power sources, respectively.

The investigations in the GS mode involved the influence of anode current density on the dielectric properties of the formed MAO coatings. The current density amounted to 5, 7.5, 10, and 15 $A \cdot dm^{-2}$. The duration of the electrolysis was determined using the principle that in each experiment, the same charge of electricity flow through the electrolysis unit. Following the calculations, durations of oxidation of 40, 26.6, 20, and 13.3 min were used.

In the AFP mode, the influence of the duration of the MAO process (1 and 2 h) in various electrolytes on the electrophysical characteristics of the coatings was evaluated. The initial current density was 20 $A \cdot dm^{-2}$.

On the basis of the published data and the results of preliminary experiments, for research have been taken three electrolytes of the alkaline-silicate group: first – 12 $g \cdot l^{-1}$ LG (LG is a technical solution of the sodium liquid glass (sodium silicate) with the specific mass of 1.4 $g \cdot sm^{-3}$); second – 2 $g \cdot L^{-1}$ KOH + 12 $g \cdot L^{-1}$ LG; third – 1 $g \cdot L^{-1}$ KOH + 6 $g \cdot L^{-1}$ LG. For the sake of simplicity, the electrolyte compositions are hereinafter denoted as 0:12, 2:12, and 1:6, respectively. The temperature of the solutions was maintained within a range of 20–35ºC.

The thickness of coating was determined by a nondestructive method, using the eddy current thickness indicator NOVOTEST TP-1.

The specific volume resistivity ρ_V and electric strength E were adopted as main characteristics of insulating properties. The volume resistivity was measured according to GOST 6433.2 using a teraohmmeter E6-13 at an operation voltage of 100 V. The reading of parameters was accomplished over a minute after the voltage was switched on.

The breakdown voltage was determined for an alternating current (50 Hz) using a laboratory set-up that included a high voltage transformer, a protective resistor 5 kΩ, and a scheme for smooth

regulation of the voltage. The measurtments started from the high voltage value.

X-ray diffraction analysis of the coatings was performed using an X-ray diffraction meter DRON-3 with monochromatic radiation of a copper anode in the range of angles 2θ within 15 to 50º, chosen taking into account the most probable phase composition of the coatings that can be expect on the basis of previous investigations[15].

Surface roughness, the arithmetic mean profile deviation R_a, was measured by Surtronic 3+ profilograph-profilometer (Taylor Hobson) on the base length of 0.8 mm.

The quality evaluation of the morphological condition of the surface layer was performed by optical microscopy using a USB-microscope Supereyes B008 and scanning electron microscopy (SEM) in secondary electron imaging mode by means of a JEOL JSM-840 microscope.

Preliminary research using panoramic micrographs (with a magnification of 15…50) allowed to determine the general morphological characteristics of the coating surface layer and to analyze the surface structure homogeneity based on the total area of samples, and to identify the presence of pores and their relative counts. The color effect features allowed to qualitatively assess the presence of different phase components.

The scanning electron microscopy analysis (with a magnification of 100…1000, significantly greater depth of focus and imaging at an angle α = 45º) allowed to qualitatively evaluate the microrelief, i.e. amplitude parameters, the shape of the structural elements of coatings, surface patterns, stages of pore formation, pore size and depth. The research was conducted on the local area, technologically stable and pre-defined coating sections.

2. Dielectric properties of coatings

Analysis of the thicknesses of the MAO layers formed in the AFP mode shows (Table 1) that their value predictably depends on the composition of electrolytes and the electrolysis duration; moreover, the temporal factor predominates. In general, the thickness of coatings on D16T alloy is greater than on AK6 ones. The advantage increases with the transition to more aggressive electrolytes containing in its composition caustic alkali – from 25...30% in a solution of 0:12 to

[15] Dehnavi, V., Liu, X.Y., Luan, B.L. et al. *Surf. Coat. Tech.* 251, 106-114 (2014).

80...90% in a solution of 2:12. The probable reason of this difference is the different etching rate of intermetallic compounds entering into alloys[16].

The thickness of the coatings prepared in the GS mode does not in fact depend on the current density, but it depends on electrolyte composition. As in the AFP mode, the minimal thickness (29 μm) forms in a diluted alkaline-silica 1:6 solution and the maximal thickness (37 μm) forms in a 2:12 solution (see Table 1).

Table 1

The thickness of the MAO coatings on deformable alloys under various electrolysis conditions, μm

Grade of alloy	Electrolyte											
	0:12		2:12		1:6		0:12		2:12		1:6	
	AFP mode, initial current density 20 A·dm^{-2}: electrolysis time, hours						GS mode, (electrolysis time)·(current density) = 200 A·min·dm^{-2}: current density, A·dm^{-2}					
	1	2	1	2	1	2	5	15	5	15	5	15
D16T	80	150	100	210	70	170	42	43	44	45	36	38
AK6	60	120	55	120	40	90	33	34	37	37	30	29

Obviously, the silicate component plays a decisive role in the rate of growth of MAO layers.

The subsequent measurement of the coatings dielectric characteristics, its specific volume resistivity ρ_V and the electrical strength E indicate (Fig. 1) the predominant effect of thickness on their values. In particular, an increase in the oxidation time, and, correspondingly, of the thickness, in two times on the AK6 alloy, led to the deterioration of the ρ_V index in 4...5 times in all electrolyte solutions (see Fig. 1, *a*). Less pronounced this effect was displayed on the alloy D16T – the corresponding decrease was 1.9...2.5 times (see Fig. 1, *b*).

The fact that dielectric properties of MAO coatings worsen when their thickness increases can be explaned by inhomogeneity of the structure of the coating itself, which increases when the thickness of the oxide layer increases, and mullite, sillimanite, and other phases, distinguished by lower values of ρ_V than for Al_2O_3 appear in its structure. Moreover, the effect of trapping the current-carrying

[16] Chigrinova, N.M., Chigrinov, V.E., Kukharev, A.A. *Powder metallurgy* 5/6, 13-23 (2001).

electrolyte ions and improvement of the conditions for migration and diffusion of the ions of alkali earth metal (in our case K+ and Na+) ander the action of temperature[17] negatively influences the ρ_V value.

The best index ρ_v provide coatings on both alloys, formed in alkali-silicate electrolyte 1:6, the lowest – in 1.7...4 times, in a solution of 2:12. In general, the coatings obtained within 1 hour in the thickness range 40...60 μm on the AK6 alloy and 70...100 μm on the D16T one are characterized by high specific resistivity (in the range $(1\ldots9)\cdot10^9$ Ω·m), but the relative advantage of this index (in 2...2.5 times) have MAO layers on AK6.

The electrical strength of the coatings (see Fig. 1, *c*, *d*), like the specific resistivity, unambiguously decreases with increasing thickness, although the total breakdown voltage in this case increases. The latter is associated with a decrease in open porosity and end-toend defects, which are a trouble spot, since the electrical strength of the air in them is only 3 $V\cdot\mu m^{-1}$.

[17] Pavlyus, S.G., Sobornitskiy, V.I., Sheprut, Yu.A. et al. *Electronic Processing of Materials* 3, 34-36 (1987).

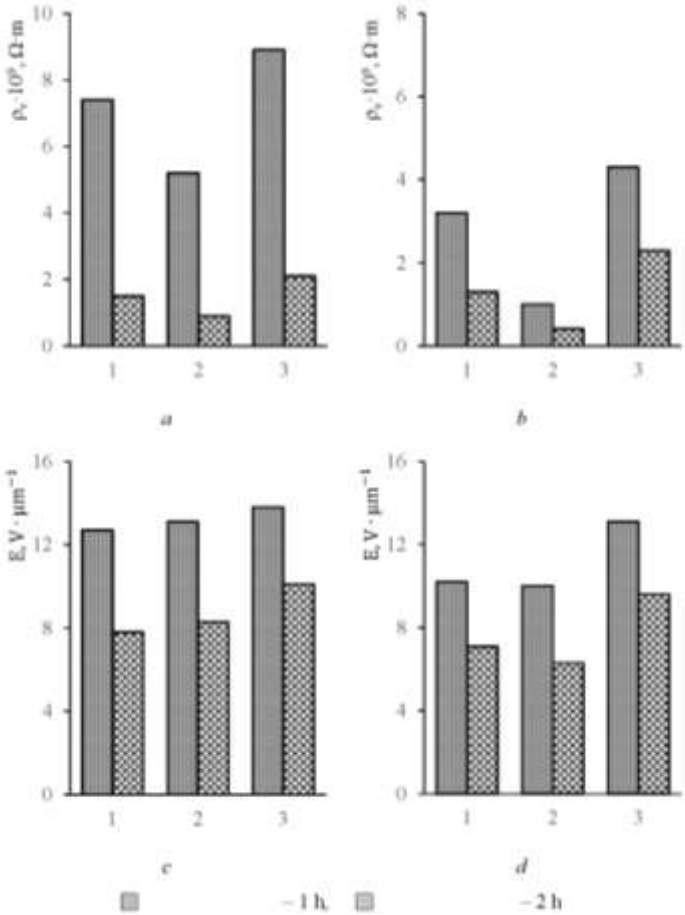


Fig. 1. Dependence of specific volume resistance (a, b) and electric strength (c, d) of the MAO coatings of AK6 (a, c) and D16T (b, d) alloys from the time of oxidation under the AFP mode in different electrolytes: *1* – 0:12; *2* – 2:12; *3* – 1:6

The reasons for the *E* deterioration with increasing the coatings thickness are the same, which lead to deterioration ρ_V – heterogeneity, the presence in the composition of aluminum oxides of different structures as well as mullites, sillimanites and other compounds with lower dielectric properties.

The index E is less dependent than ρ_V on the alloy grade and the electrolyte composition, but a slight advantage of 10...30% is observed in MAO coatings formed in a 1:6 electrolyte solution; in this case the value of E reaches 13…14 V·μm^{-1}.

Both electrophysical parameters (ρ_V more substantially) depend on the electrolyte composition. It can be said that for the AFP mode the coating formed in a 1:6 solution exhibit the best dielectric properties and those formed in a 2:12 solution exhibit relatively worse characteristics (Fig. 1).

Analysis of the dielectric properties for the coating prepared in GS mode for both alloys, AK6 (Fig. 2, *a*, *c*) and D16T (Fig. 2, *b*, *d*) allowed to note tendency when the current density j increases. This can be associated with the increase in porosity that is typical for GS modes and the saturation of the composite coating by electrolyte elements.

The difference between the ρ_V values of the coatings formed in various electrolytes is more pronounced. The best result was found for the liquid glass solution 0:12; the worst result was obtained for solution 2:12, which was lower by a factor of 1.6–1.9.

The presented results are in qualitative agreement with the values of the forming voltage that become settled at the end of the MAO process in each solution independently of the current density. Respectively, the greatest voltage was observed in the silicate 0:12 electrolyte – 560 V on AK6, and 580 V on D16T; the least one of 520 V in the alkaline-silicate 2:12 electrolyte on both alloys. One of the reasons that the parameter ρ_V becomes worse in the 2:12 solution may be already noted above in the analysis of results in the AFM mode the elevated concentration of ions of alkaline metal, in it that leads to a relatively greater concentration of these ions in the composition of the coating.

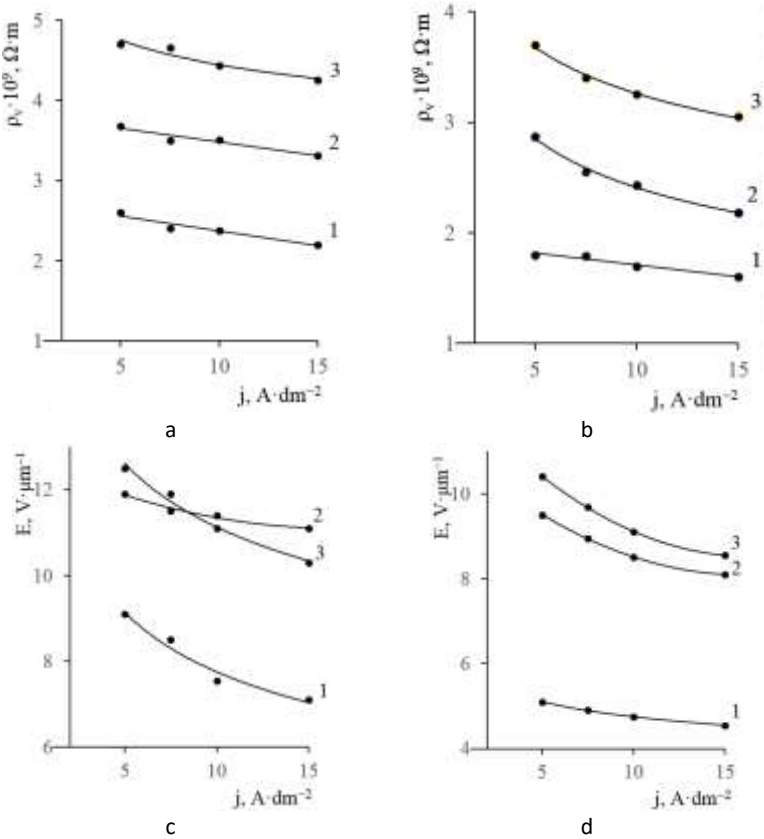


Fig. 2. Dependence of specific volume resistance (a, b) and electric strength (c, d) of the MAO coatings of AK6 (a, c) and D16T (b, d) alloys from the anode current density under the GS mode in different electrolytes: *1* – 0:12; *2* – 2:12; *3* – 1:6

The character of the variation of the electric strength of the coatings versus the investigated factors for both alloys – AK6 (Fig. 2, *c*), and D16T (Fig. 2, *d*), as could be expected is similar to the dependence of the specific resistance on them. In particular, for electrolitytes 0:12 and 2:12 the tendency of diminishing of the parameter with the increasing of the current density (curves *1* and *3*) is retained or becomes even stronger; the influence of the qualitative and quantitative composition of the electrolytes is to some degree smooth (curves *2* and *3*). The best values of the electric strength in GS mode – in 1:6 and 0:12 solutions.

Table 2

The main phase composition of MAO coatings on AK6 alloy at various conditions of their electrolysis in time τ (M – mullites ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$); γ and α – γ and α phases of Al_2O_3)

Grade of alloy	Mode	Electro-lyte	j, A·dm^{-2}	τ, мин	Phase	I_γ / I_m	Q_p, %
D16T	AFP	0:12	30	60	M, γ, halo	0.46	5
		2:12	30	60	M, γ, halo	0.83	8
		1:6	30	60	γ, M	3.8	40
	GS	0:12	7.5	26.6	M,γ traces, halo	0.55	5
			15	13.3	M, γ, halo	0.62	6
		2:12	5	40	γ, M, α traces	1.6	16
			15	13.3	M, γ	0.88	9
		1:6	5	40	γ, M	1.8	18
			15	13.3	γ, M	1.89	19
AK6	AFP	0:12	20	60	γ, M	1.34	13
		2:12	20	60	M, γ	0.33	3–5
		1:6	20	60	γ, M traces	10	100
	GS	0:12	5	40	γ, M	1.19	11
			15	13.3	γ, M	0.96	10
		2:12	5	40	γ, M	2.5	25
			15	13.3	γ, M	2.4	24
		1:6	5	40	γ, M	2.4	24
			15	13.3	γ, M	5	50

In general, from comparison the electrophysical parameters of MAO coatings formed on both alloys using the two electric modes, it can see that the results related to the choice of the efficient electrolyte composition correlate. In all cases, the 1:6 and 0:12 solutions exhibit distinct advantages.

Analysis of the results of X-ray diffraction investigations (see Table 2) shows that the phase composition of the coatings, in particular, the quantity of γ – Al_2O_3 and its relationship to the mullite phase by radiation intensity (I_γ / I_m) or relative estimation of the values of this ratio (Q_p, %) are not the determining parameters for the dielectric properties.

Obviously, these parameters of MAO coatings respond to the integral influence of all the components of the composite substance, including the radiotransparent and unidentified ones. This first of all relates to the ions of

alkaline metals that worsen the dielectric properties of the coatings[18]; the quantity of the ions can be determined using an X-ray spectral microanalysis.

3. Morphology and microgeometry of coatings

On Fig. 3, R_a values demonstrate that the surface roughness of both studied alloys after MAO, especially oxidated in the AFP mode, increases significantly. The rate of increase of its absolute value depends on the electrolyte composition and process duration in the AFP mode, and reaches a factor of 4…6, compared to the baseline R_a value. A two-fold increase of the electrolysis time and, therefore, of coating thickness (Table 1) results in further R_a increase. However, roughness increase associated with this factor is not very significant and constitutes 10…20 % (Fig. 3, *a*, *b*). The roughness increase proportional to the coating thickness can be explained by a significant coating destruction[19], if the power of the solitary visually observable spark discharges increases. It is also possible to state that coating roughness is almost independent from the components of the oxidated alloys, but it is more sensitive to electrolyte composition.

In particular, the lowest R_a value (25–40 % lower) is fixed in 1:6 solution with the minimal LG concentration. The effect of LG concentration is critical for this coating surface characteristic, if all the other factors of the MAO process being equal. This result fully correlates with the conclusions of the research[20] regarding the correlation between the increasing roughness and silicate concentrations.

In the GS mode the rate of roughness increase is generally somewhat lower and is a factor of 2…5. Under conditions of indifference of the coating thickness to a change in current density (Table 1), R_a dependences not only from the electrolyte composition but also of current density are manifested (Fig. 3, *c*, *d*). Last mentioned dependency is not monotonic, but extremal in 0:12 and 1:6 solutions. In fact, R_a index increases in the range of 5…10 $A \cdot dm^{-2}$ and subsequently drops as current density increases till 15 $A \cdot dm^{-2}$. The smoothing effect could be well observed even with no auxiliary optical devices: the structure and color of the oxidated surface became significantly more homogenous with this current density.

---

[18] Martin, J., Leone, P., Nomine, A. et al. *Surf. Coat. Tech.* 269, 36-46 (2015).

[19] Hussein, R.O., Northwood, D.O. In: *Developments in Corrosion Protection*, 201-239. InTech, Rijeka, Croatia (2014).

[20] Chernenko, V.I., Snezhko, L.A., Papanova, I.I. Obtaining of coatings by anode-spark electrolysis. Leningrad, Chemistry (1991).

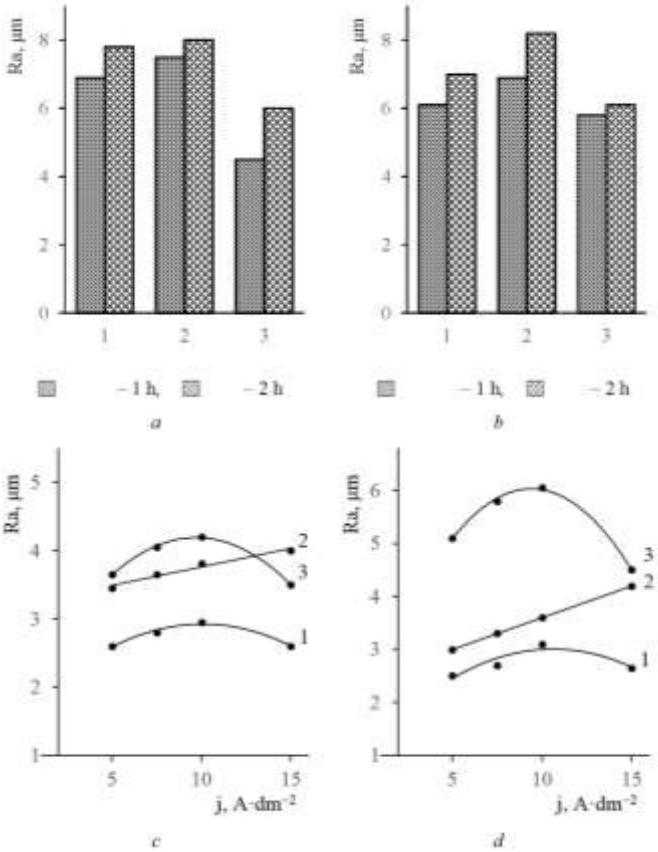


Fig. 3. Dependences of surface roughness of the MAO coatings on the time of oxidation in the AFP mode (a, b) and current density in the GS mode (c, d) of AK6 (a, c) and D16T (b, d) alloys in different electrolytes: *1* – 0:12; *2* – 2:12; *3* – 1:6

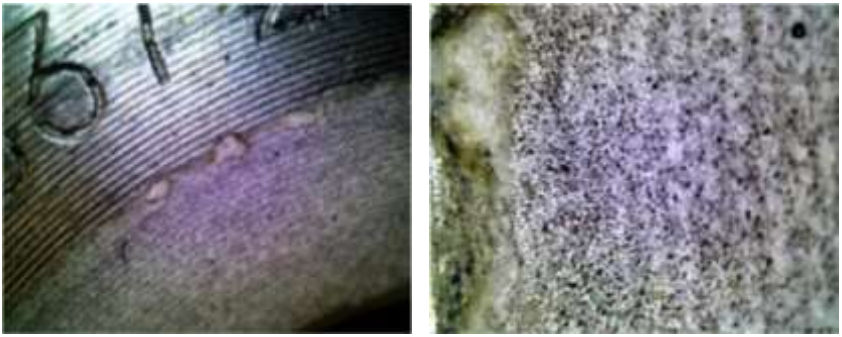
The enhancement of R_a index at j = 15 A·dm^{-2} can be accounted for the Joule's heat release (~ j^2), which is sufficient at this current density for fusion and melting to occur both within the coating layer and on the surface structures, in particular, fusion and melting of aluminum oxides and silica. A presence of concentrated alkali in 2:12 solution can offset this effect due to an increased etching action of the harsh component

(KOH), which results in the monotonic R_a increase proportional to the current density.

Similarly to the alternating current oxidation under the AFP mode, the minimum roughness value of dielectric coatings produced under the GS mode is achieved in the 1:6 electrolyte.

It was noted above that on both alloys, the best indicators of specific volume resistance are provided by coatings also formed in the electrolyte 1: 6.

The electric strength of the coatings (see Table 1 and Fig. 1 together), as well as the specific volume resistance, decreases with increasing thickness. The latter is associated with a relative increase in open porosity (Fig. 4) and through defects, the electric strength of the air of which is only 3 V·μm^{-1}.



10^x 100^x

Fig. 4. Microphotographs of the surface of the diamond grinding wheel wramework from AK6 aluminum alloy with a local MOA coating

The results of the electron scanning microscopy morphological research of the MAO coatings on AK6 alloy (Fig. 5) allow to make some generalizations.

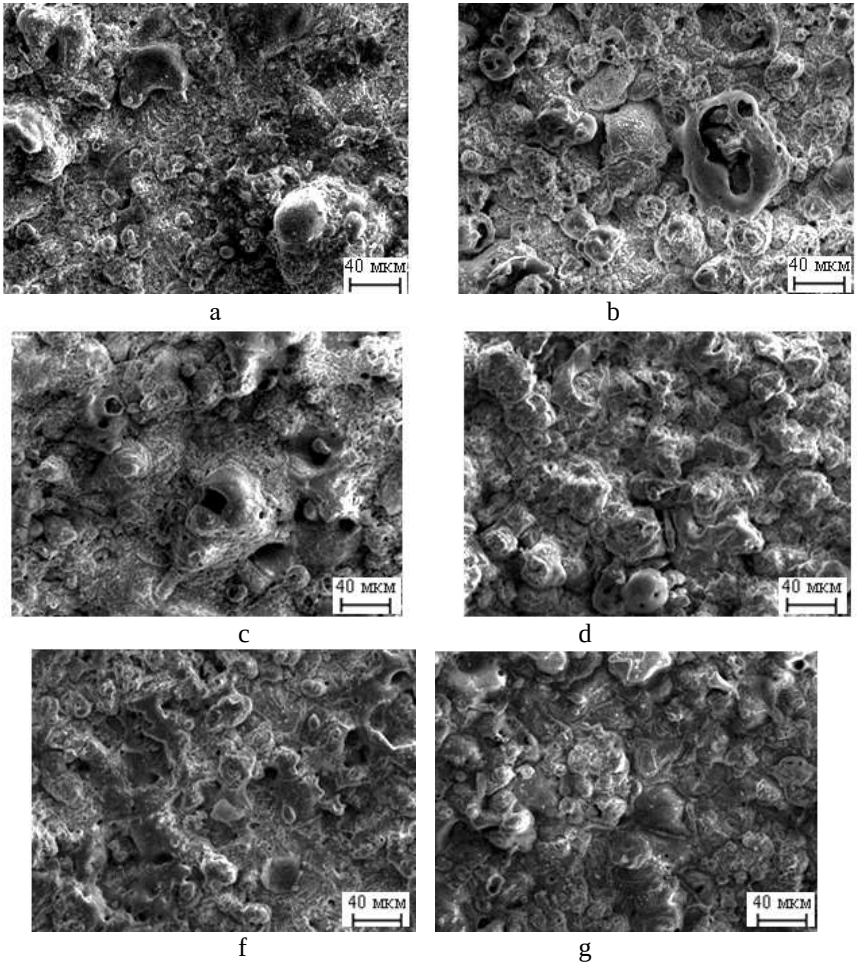


Fig. 5. Morphology of the surface of MDO coatings on AK6 alloy after AFP mode in 1 (a, c, f) and 2 (b, d, g) hours in different electrolytes: a, b – 0:12; c, d – 2:12; f, g – 1: 6

In particular, it is possible to state that all MAO coating surfaces produced under the AFP mode using alternating current have a well-developed relief with alternate peaks and valleys formed by separate conglomerates of compounds of the outer layer.

Open and closed pores were observed on all samples in the largest field of vision of optical microscopy (1.2 mm, magnification x100). The size, relative counts and pore depth depend upon the PEO mode (electrolyte composition, duration of electrolysis).

Comparing the surface morphology of samples oxidated by the same electrolyte at different time points (see Figures 5, *a* and 5, *b*; 5, *c* and 5 *d*; 5, *f* and 5, *g*), it is possible to state that the morphological structure becomes more developed and demonstrates more prominent relief with clear boundaries of particles in all dimensions.

This qualitatively correlates with the results of analysis of roughness R_a, which also shows a tendency to increase with the electrolysis time increasing. The R_a change for AK6 alloy after AFP mode in various electrolytes (see Fig. 3, *a*) occurs in the ranges of 6.6...7.5 μm; 7.5...7.8 μm and 4.7...6.0 μm, respectively.

Comparing the morphology of the MAO coating surfaces produced by various electrolytes, it is possible to conclude that the difference is the most pronounced for 2:12 solution (see Fig. 3, *c* and 3, *d*).

The surface morphology produced in this solution is smoother and characterized by less marked variance of amplitude parameters and convexity of the surface conglomerate particles of the coating materials, as compared to surfaces oxidated in 0:12 and 1:6 solutions.

Another prominent morphological feature is a relatively high accessible porosity of this coating. Pore sizes range from 2 to 10 μm and more, some of them (predominantly, larger size pores) are quite deeply expanded. These circumstances can impair (i.e. increase) the R_a roughness index, which was observed during the research (see Fig. 3).

On the other hand, increased porosity, particularly accessible porosity[21], can contribute to the impairment of the isolation properties which was confirmed by the results of previous research[22].

The critical factor that contributes to the characteristic surface morphology in 2:12 solution is most probably the alkaline component of the KOH solution and its destructive action, which increases proportionally to the alkaline concentration. This can be indirectly confirmed by more moderate surface relief in 1:6 solution, where KOH concentration is twice as low (see Fig. 5, *f* and 5, *g*).

---

[21] Curran, J.A., Clyne, T.W. *Acta Mater.* 54 (7), 1985-1993 (2006).

[22] Gutsalenko, Yu.G., Sevidova, E.K., Stepanova, I.I. et al. *Probl. At. Sci. Technol.* 114, 125-127 (2018).

An insignificant pore percentage is recorded on this surface (which is lower compared to the surface produced in 2:12 solution), pore sizes decreasing to 1…6 μm. The electrolysis time increased to 2 hours results in a further reduction both sizes and quality of open pores.

In this research, the CEM study results were considered as supplementary. At the same time, they enable to interpret the coating characteristics observed by means of other techniques. This particularly pertains to the roughness parameters and dielectric properties.

Based on the morphology research results, it is possible to state that 1:6 alkaline-silicate solution (1 $g \cdot L^{-1}$ KOH + 6 $g \cdot L^{-1}$ LG) is the most appropriate electrolyte for MAO coatings formation with minimum values of roughness and porosity. It is important that the best indicators of the dielectric properties of coatings were obtained with alternating current in the AFP mode in this particular solution.

CONCLUSIONS

In general, both modes of the formation of MAO coatings provide sufficiently high parameters for ρ_V and E. At the same time, the absolute values of parameters ρ_V and E are greated by a factor of 1.5–2.5 for the coatings on AK6 and 1.2–1.9 for the coatings on D16T which are formed using an anode-catode (alternating) current in the AFP mode at the comparable thicknesses. This may be the reason to choose this mode as a basis method for the development of technology of formation of isolation coatings on aluminium frameworks of diamond-abrasive wheels to provide an expansion of technological capabilities of machine tool technical grinding system for realization of combined electrophysical processing.

Established results do not contradict the conventional knowledge, since studies of other features of the functional quality of coatings at comparable thicknesses have established that the MAO layers obtained at alternating current are more homogeneous and less defective[23], and this obviously also has a positive effect on the barrier electrophysical parameters.

It is established that the best results of the dielectric properties on both alloys – $\rho_V = (4…9) \cdot 10^9$ Ω·m and E = 13…14 $V \cdot \mu m^{-1}$ – provides moderately concentrated alkaline-silicate electrolyte 1:6 with relative

[23] Bakovets, V.V., Polyakov, O.V., Dolgovesova, I.P. *Plasma-electrolytic anodic processing of metals.* Science, Novosibirsk (1991).

mass contents of potassium alkali and sodium silicate respectively 1 g·L^{-1} and 6 g·L^{-1}.

Based on the research, it was established that the formation of dielectric insulation coatings on the surface of D16 and AK6 alloys using the MAO technique results in an increase of the output R_a value by a factor of 2…6, depending upon the electrolysis conditions: electrolyte composition, electricity mode, process duration (coating thickness). It was established that the lowest R_a value for both alloys and electrical modes (AFP and GS) was provided also with the electrolyte composition 1:6.

Under the conditions of the GS regime of the formation of coatings of equal thickness, the roughness of their surface depends on the density of the anode current j. This dependence, within the studied values of j (up to 15 A·dm^{-2}), is extreme for solutions of 0:12 and 1: 6.

Microscopic studies of the surfaces of MDO coatings allow to state a qualitative correlation of their morphological features with microgeometric roughness estimates. Taking into account the results of morphological studies of open porosity of coatings increases the objectivity of choosing a rational electrolyte composition for the formation of electrical insulating coatings not only in terms of roughness, but also in terms of functional indicators.

SUMMARY

The presented work is focused on the development of technologies for the formation of electrical insulating coatings on aluminum frameworks of diamond-abrasive wheels, which provide the expansion of technological capabilities of machine tool technical grinding systems for the implementation of combined electrophysical processing. The technological capabilities of electrical insulating microarc oxidation as applied to deformable aluminum alloys of grades D16T (1360) and AK6 (2124) GOST 4784-97 (ISO 209-1) used in the manufacture of frameworks of diamond grinding wheels in the tool industry were studied. The studies were carried out for two main in practice microarc oxidation of electric modes – anode galvanostatic with a transformer (up to 600 V) current source with a current density of up to 15 A·dm^{-2} in the experiments and auto-falling power on the anode-cathode (alternating) current from a capacitor current source with a current density of 20 A·dm^{-2}. The technological medium of microarc oxidation in the performed studies consisted of alkaline-silicate group electrolytes with zero, 1 and 2 g·L^{-1} KOH concentration in the presence of sodium silicate at levels of 6 and 12 g·L^{-1}. The temperature of the aqueous solutions was maintained in the range from normal to 35 °C. The influence of the time

of the microarc oxidation process was evaluated in a auto-falling power mode. The data of roentgenologic studies, conventional and electron microscopy of the obtained coatings, and control of their roughness are presented and analyzed. It has been shown that microarc oxidation by its nature worsens the roughness of machined initial surfaces. The data of x-ray studies, conventional and electron microscopy of the obtained coatings, and control of their roughness are presented and subjected to analysis. It has been shown that microarc oxidation by its nature worsens the roughness of machined initial surfaces. At the same time, the extreme nature of the dependence of the average microroughness height on the anode current density during microarc oxidation in the calvanostatic mode in electrolytes with a low concentration of the alkaline component was revealed and explained. It was shown that the data of microscopic visualization of the coating surface qualitatively correlate with the microgeometric and dielectric functional parameters of the coatings. The dielectric quality of the obtained oxide coatings was evaluated by the specific volume resistance and electric strength. The rational conditions for the formation of dielectric coatings on the studied aluminum alloys are determined. Information is presented for the practical implementation of the development of local electrical insulating coatings of a high-performance processing technology tool with the introduction of electric discharge energy into the cutting zone to maintain the functionability of grinding wheels with a diamond-metal composition of the working part.

REFERENCES

1. Mikheev, A.E., Terekhin, N.A., Statsura, V.V., Golenkova, A.A. Technological possibilities of microarc oxidation of aluminum alloys. *Bulletin of Machine Building*. 2, 56-63 (2003). In Russian.

2. Famiyeh, L., Xiaohu, H. Plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum alloys: microstructures, properties, and applications. *Mod. Concept Material Sci.* 2 (1), 000526 (2019). URL: https://irispublishers.com/mcms/pdf/MCMS.MS.ID.000526.pdf.

3. Student, M.M., Posuvailo, V.M., Veselivs'ka, H.H., Sirak, Ya.Ya., Yatsyuk R.A. Corrosion Resistance of Plasma-Electrolytic Layers on Alloys and Coatings of the Al–Cu–Mg System for Various Modes of Heat Treatment. *Mater. Sci.* 53 (6), 789-795 (2018). URL: https://doi.org/10.1007/s11003-018-0137-8.

4. Rudnev, V.S., Medkov, M.A., Yarovaya, T.P., Steblevskaya, N.I., Nedovzorova, P.M., Belobeletskaya, M.V. Combination of plasma-electrolytic oxidation and extraction-pyrolytic method for formation of

metal oxide layers. *Journal of Applied Chemistry* 85 (4), 621-628 (2012), URL: https://doi.org/10.1134/S1070427212040155.

5. Borisov, A.M., Krit, B.L., Lyudin, V.B., Morozova, N.V., Suminov, I.V., Apelfeld, A.V. Microarc oxidation in slurry electrolytes: A review. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 52, 50-78 (2016), URL: https://doi.org/10.3103/S106837551601004X.

6. Suminov, I.V., Belkin, P.N., Apelfeld, A.V., Ludin, V.B., Krit, B.L., Borisov, A.M. *Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys*: Book 2. Technosphera, Moscow, 511 p. (2011). In Russian.

7. Walsh, F.C., Low, C.T.J., Wood, R.J.K., Stevens, K.T., Archer, J., Poeton, A.R., Ryder, A. Plasmaelectrolytic oxidation (PEO) for production of anodized coatings on light weight metal (Al, Mg, Ti) alloy. *Trans. Inst. Metal Finish.* 87 (3), 122–135 (2009). URL: https://doi.org/10.1179/174591908X372482.

8. Filyak, M.M., Kanygina, O.N. Electrophysical properties of anodic aluminum oxide. *Bulletin of the Orenburg State University*. 9 (158), 240-243 (2013). URL: http://vestnik.osu.ru/2013_9/39.pdf. In Russian.

9. Gutsalenko, Yu.G., Sevidova, O.K. Concept and design and technological development of tools from superhard materials for diamond-spark grinding on universal machines. *Reliability of instrument and optimization of technological systems*. 40, 35-43 (2017). URL: www.dgma.donetsk.ua/science_public/reliability_instrument/archieve/ № 40.pdf].

10. Tokarev, A.V. Electrophysical characteristics of coatings on aluminum obtained by microarc oxidation. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University* 12 (10), 106-110 (2012). URL: https://krsu.edu.kg/vestnik/2012/v10/a29.pdf. In Russian.

11. Sevidova, E., Gutsalenko, Yu., Rudnev, A., Pupan, L., Titarenko, O. The study of surface microgeometry and morphology of plasma electrolytic oxidation dielectric coatings on aluminum alloys. *LNME:* Advances in Design, Simulation and Manufacturing II: DSMIE 2019 Conf. Proc., 302-310 (2020), URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_30.

12. Gutsalenko, Yu.G., Sevidova, E.K., Stepanova, I.I. Evaluation of technological capability to from dielectric coatings on AK6 alloy, using a method of microarc oxidation. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 55 (5), 602-606 (2019), URL: https://doi.org/10.3103/S1068375519050041.

13. Gutsalenko, Yu.G. *Diamond-spark grinding of high functionality materials.* Cursor, Kharkov, 272 p. (2016), http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/dsghfm-monograph.pdf. In Russian.

14. Dehnavi, V., Liu, X.Y., Luan, B.L., Shoesmith, D.W., Rohani, S. Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 aluminum alloys. *Surf. Coat. Tech.* 251, 106-114 (2014). URL: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.010.

15. Chigrinova, N.M., Chigrinov, V.E., Kukharev, A.A. Formation of coatings by the method of anodic microarc oxidation and their operation in heat-stressed assemblies. *Powder metallurgy* 5/6, 13-23 (2001). In Russian.

16. Pavlyus, S.G., Sobornitskiy, V.I., Sheprut, Yu.A., Snezhko, L.A., Chernenko, V.I. Dielectric properties of anodic-sparked silicate coatings on aluminum. *Electronic Processing of Materials* 3, 34-36 (1987). In Russian.

17. Martin, J., Leone, P., Nomine, A., Veys-Renaux, D., Henrion, G., Belmonte, T. Influence of electrolyte ageing on the Plasma Electrolytic Oxidation of aluminium. *Surf. Coat. Tech.* 269, 36-46 (2015). URL: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.001.

18. Hussein, R.O., Northwood, D.O. Production of anti-corrosion coatings on light alloys (Al, Mg, Ti) by Plasma-Electrolytic Oxidation (PEO). In: *Developments in Corrosion Protection*, 201-239. InTech, Rijeka, Croatia (2014), URL: https://dx.doi.org/10.5772/57171.

19. Chernenko, V.I., Snezhko, L.A., Papanova, I.I. *Obtaining of coatings by anode-spark electrolysis*. Leningrad, Chemistry, 128 p. (1991). In Russian.

20. Curran, J.A., Clyne, T.W. Porosity in plasma elecrtrolytic oxide coatings. *Acta Mater.* 54 (7), 1985-1993 (2006). URL: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.12.029.

21. Gutsalenko, Yu.G., Sevidova, E.K., Stepanova, I.I., Strel'nitskij, V.E. Evaluation of dielectric properties of micro-arc coatings on deformable aluminum alloys. *Probl. At. Sci. Technol.* 114, 125-127 (2018). URL: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2018_2/article_2018_2_125r.pdf.

22. Bakovets, V.V., Polyakov, O.V., Dolgovesova, I.P. *Plasma-electrolytic anodic processing of metals.* Science, Novosibirsk, 168 p. (1991). In Russian.

Information about author:
Gutsalenko Yu. G.,
Senior Staff Scientist,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
2, Kyrpychova str., Kharkiv, 61002, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.7

МОДЕЛІ І МЕТОДИ ПРЕДСТАВЛЕННЯ АРХІТЕКТУРНИХ РІШЕНЬ КРИТИЧНОЇ ІТ-ІНФРАСТРУКТУРИ

Дорогий Я. Ю.

ВСТУП

У науковій літературі зустрічаються різні формальні і неформальні описи розподілених систем (РС)[1,2,3]. Характерною властивістю РС є наявність взаємодіючих компонентів системи. У цій роботі основна увага приділяється моделюванню та верифікації моделей особливого класу розподілених систем – критичним ІТ-інфраструктурам, тому далі під компонентами РС розуміються взаємодіючі процеси, критичні та некритичні. Процеси виконуються на одному або декількох обчислювальних пристроях. У загальному випадку обчислювальні пристрої можуть бути фізично віддалені один від одного. У цій роботі затримка, що виникає під час передачі даних, не враховується, і взаємодія процесів вважається миттєвою.

Далі під розподіленою системою будемо мати на увазі критичну ІТ-інфраструктуру.

Для аналізу поведінки розподіленої системи часто як модель РС використовуються транзиційні системи (Transition System, TC)[4]. Ключовими складниками системи переходів є поняття стану і переходу. Стан ТС є абстракцією стану розподіленої системи. У стані ТС відображені значення структур цих процесів РС, необхідних для аналізу її поведінки. Зі стану моделі може здійснюватися перехід в одне або кілька наступних станів. Перехід відповідає локальній або комунікаційній події РС, що моделюється.

---

[1] Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. P. 610.

[2] Tanenbaum A., van Steen M. Distributed Systems: Principles and Paradigms. Upper Saddle River: Create Space Independent Publishing Platform, 2016. P. 704.

[3] van Steen M., Tanenbaum A.S. A brief introduction to distributed systems. *Computing*. 2016. № 98 (10). С.967-1009.

[4] Теленик С.Ф., інш. Методы исследования свойств высокопроизводительных инфраструктур. Обзор. *Фундаментальные и прикладные проблемы информатики и информационных технологий*. 2015. № 1. С. 3-13.

ТС можуть супроводжуватися розміткою станів та/або переходів. У цьому разі говорять про розмічені транзиційні системи (Labelled Transition System, РТС)[5]. У роботі використовуються РТС з розміткою станів значеннями булевих змінних і розміткою переходів назвами комунікаційних дій. Під час побудови моделі будуються РТС процесів РС. Модель всієї РС утворюється в результаті паралельної композиції РТС процесів.

1. Розмічені транзиційні системи

Нехай задана множина можливих міток дій ***A.*** Дії відповідають класам еквівалентності подій ***E.*** Прикладами дій можуть бути: відсилання / отримання повідомлень процесом або компонентом, зміна стану процесу або компоненту тощо. Далі мається на увазі, що всі дії РТС належать множині ***A***. В множині також знаходиться спеціальна неспостережна дія τ.

Означення 1.1. РТС називається шістка $(S, S^0, A, R, \Sigma, L)$, в якій S – скінченна множина станів, S^0 – підмножина S початкових станів системи, $A \in \boldsymbol{A}$ – скінченна множина міток дій, R – відношення переходів на множині $S \times A \times S$, Σ – множина змінних системи, L – функція розмітки станів $L: S \to 2^{\Sigma}$.

Далі будемо використовувати запис $s \xrightarrow{a} t$, що означає $(s, a, t) \in R$ для $s, t \in S, a \in A$. За допомогою відношення R задаються можливі варіанти дискретних переходів з одного стану до іншого. Переходи супроводжуються мітками дій.

Для кожного стану $s \in S$ за допомогою функції L задаються значення змінних з множини Σ в стані s.

За допомогою символу $\mathcal{M}$ будемо позначати множину всіх РТС.

Означення 1.2. Скінченним шляхом π в РТС $(S, S^0, A, R, \Sigma, L)$ називається така скінченна послідовність станів та дій $s_1, a_1, ..., a_{n-1}, s_n$, які чергуються, що $s_i \in S, a_j \in A$ для всіх $1 \le i \le n, 1 \le j < n$ та $(s_i, a_i, s_{i+1}) \in \boldsymbol{R}$ для всіх $1 \le i < n$. Нескінченним шляхом називається така нескінченна послідовність станів та дій $s_1, a_1, ..., a_{n-1}, s_n, ...$, які чергуються, що $s_i \in S, a_j \in A$ для $i \le 1, j \ge 1$ та $(s_i, a_i, s_{i+1}) \in \boldsymbol{R}$ для всіх $i \ge 1$.

---

[5] Крывый С.Л., Максимец А.Н. Верификация программ: состояние, проблемы, результаты. *Кибернетика и системный анализ*. 2013. Т. 49. С. 3–14.

Далі скінченний шлях $\pi = s_1, a_1, ..., a_{n-1}, s_n$ будемо позначати як $s_1 \overset{a_1,...,a_{n-1}}{\to} s_n$, а нескінченний шлях $\pi = s_1, a_1, ..., a_{n-1}, s_n, ...,$ як $s_1 \overset{a_1,...,a_{k-1}}{\to} s_k \overset{a_k}{\to} ...$ Для скінченного або нескінченного шляху π запис $\mathrm{suf}(\pi, k)$ означає суфікс шляху π, який починається з стану s_k.

Означення 1.3. Для шляхів на множині станів S визначимо таку функцію станів, які зустрічаються на шляху, $\mathrm{PrS}: S^* \cup S^\omega \to 2^S$. Стан $s \in \mathrm{PrS}(\pi)$ для шляху $\pi = s_1 \overset{a_1,...,a_{k-1}}{\to} s_k \overset{a_k}{\to} ...$ тоді і тільки тоді, коли знайдеться таке $i \geq 1$, що $s = s_i$.

Означення 1.4. Нехай задана РТС $M = (S, S^0, A, R, \Sigma, L)$ та шляхи $\alpha' = s_1 \overset{a_1,...,a_{m-1}}{\to} s_m$, $\alpha'' = t_1 \overset{b_1,...,b_{n-1}}{\to} t_n$ і при цьому $s_m = t_1$. Тоді конкатенацією шляхів α' і α'' назвемо шлях $\alpha = s_1 \overset{a_1,...,a_{m-1}}{\to} t_1 \overset{b_1,...,b_{n-1}}{\to} t_n$. Далі будемо позначати конкатенацію шляхів α' і α'' як $\alpha = \alpha' \circ \alpha''$.

Означення 1.5. Для РТС $M = (S, S^0, A, R, \Sigma, L)$ стан $t \in S$ називається досяжним із стану $s \in S$, якщо знайдеться деякий скінченний шлях $\alpha = s \overset{a_1}{\to} s_1 ... s_k \overset{b}{\to} t$. Стан t називається досяжним, якщо він є досяжним з деякого початкового стану РТС.

Означення 1.6. Нехай задана РТС $M = (S, S^0, A, R, \Sigma, L)$ та функція перейменування дій $\mathrm{ren}: A \to A'$. Тоді результатом застосування функції ren до РТС M (позначається як $\overset{\mathrm{ren}}{M}$) є така РТС $M_l = (S_l, S_l^0, A_l, R_l, \Sigma_l, L_l)$, що:

– вірні рівності $S_l = S, S_l^0 = S^0, A_l = A, R_l = R, \Sigma_l = \Sigma, L_l = L)$,

– перехід $(s, a, t) \in R$ виконується тоді і тільки тоді, коли $(s, \mathrm{ren}(a), t) \in R_r$.

В подальшому будемо використовувати спеціальну функцію ren^i дописування індексу i діям РТС, яка відображає кожну дію a на дію a_i.

Означення 1.7. Нехай задана РТС $M = (S, S^0, A, R, \Sigma, L)$ та функція початку переходу $\mathrm{bg}: R \to S$. Тоді результатом застосування функції bg до $r_i \in R$ (позначається як $\mathrm{bg}(r_i)$) є стан початку переходу r_i, тобто $\mathrm{bg}(r_i) \in s_i, s_i \in S$.

Означення 1.8. Нехай задана РТС $M = (S, S^0, A, R, \sum, L)$ та функція кінця переходу $\text{end} : R \to S$. Тоді результатом застосування функції end до $r_i \in R$ (позначається як $\text{end}(r_i)$) є стан кінця переходу r_i, тобто $\text{end}(r_i) \in s_i, s_i \in S$.

1.1. Асинхронна паралельна композиція РТС

Розглянемо деревоподібний хвилевий алгоритм як приклад РТС. В алгоритму приймають участь процеси трьох типів: кореневий процес-ініціатор (прототип Root); процес, який відповідає листовій вершині комунікаційного дерева (прототип Inner); процес, який відповідає внутрішній вершині комунікаційного дерева (прототип Leaf).

За алгоритмом процес-ініціатор посилає повідомлення своїм нащадкам. Процеси типу Inner отримують повідомлення від батьківського процесу та надсилають його далі своїм нащадкам. Процеси типу Leaf отримують повідомлення, запускають задачу прийняття рішення та надсилають у відповідь підтвердження. Процеси типу Inner, отримавши підтвердження від всіх нащадків, також запускають задачу прийняття рішення, після чого передають підтвердження батьківському процесу.

На рис. 1 представлені діаграми РТС прототипів процесів алгоритму для бінарного дерева. Стани РТС зображені у вигляді еліпсів. Початкові стани: s_0, t_0, u_0. Переходи позначаються діями *rcv_left, rcv_right, snd_left, snd_right*. Дія з префіксом *rcv* відповідає отриманню повідомлення, а дія з префіксом *snd* відповідає відправці повідомлення. Переходи, для яких не вказана мітка, позначені дією τ.

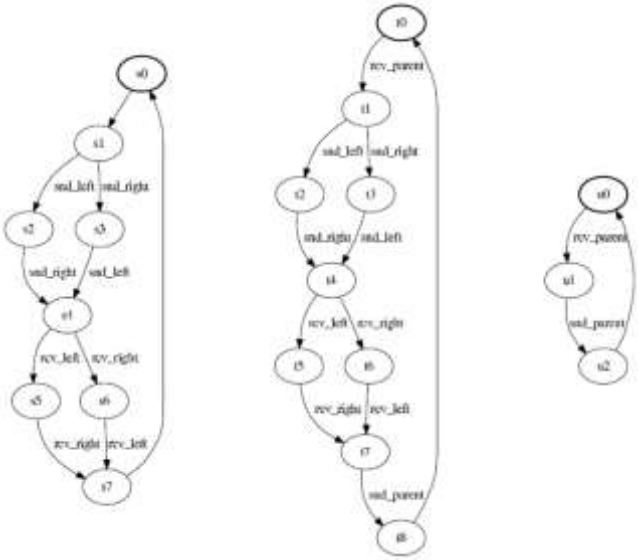


Рис. 1. Діаграми РТС процесів типу Root, Inner, Leaf

Для опису правил взаємодії на РТС визначається операція паралельної композиції. За допомогою цієї операції будується нова РТС, яка моделює асинхронне виконання та синхронний обмін повідомленнями двох вихідних РТС. Маючи РТС всіх процесів ***E,*** можна побудувати РТС всієї ***E***, виконуючи ітеративно операцію паралельної композиції.

Означення 1.9. Нехай задані РТС $M_1 = (S_1, S_1^0, A_1, R_1, \Sigma_1, L_1)$ та $M_2 = (S_2, S_2^0, A_2, R_2, \Sigma_2, L_2)$ такі, що

$$S_1 \cap S_2 = \varnothing, A_1 \cap A_2 = \varnothing, \Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \varnothing.$$

Нехай також задана синхронізаційна пара

$$\Lambda = (\Delta, \bar{\ }), \Delta \subseteq A_1, \bar{\ } : \Delta \to A_2.$$

Тоді модель $M = (S, S^0, A, R, \Sigma, L)$ називається паралельною композицією РТС M_1 і M_2, якщо:

– вірні співвідношення

$$S = S_1 \times S_2, S^0 = S_1^0 \times S_2^0, A = A_1 \cup A_2 \setminus (\Delta \cup \bar{\Delta}),\ \Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2,$$

– вірно $L : S \to 2^{\Sigma},\ L((s_1, s_2)) = L(s_1) \cup L(s_2),$

– відношення $R \subseteq (S_1 \times S_2) \times A \times (S_1 \times S_2)$ задається наступним чином: $((s,u),a,(t,v)) \in R$ тоді і тільки тоді, коли виконується одна з трьох умов:

а) виконується перехід першої моделі: $(s,a,t) \in R_1, u = v$;

б) виконується перехід другої моделі: $(u,a,v) \in R_2, s = t$;

в) виконується синхронний обмін повідомленнями: $(s,b,t) \in R_1, (u,b,v) \in R_2, a = \tau$.

Розглянемо операцію композиції на прикладі хвильового алгоритму. Нехай M_1 і M_2 – РТС двох процесів, отриманих з РТС прототипів Inner та Leaf відповідно шляхом перейменування за допомогою функцій ren^1 і ren^2. Визначимо синхронізатор $\Lambda = (\Delta, \bar{\ })$ наступним чином: $\Delta = \{snd_left_1, rcv_left_1\}$, $\overline{snd_left_1} = rcv_parent_2, \overline{rcv_left_1} = snd_parent_2$. Тоді прикладами переходів РТС $M = M_1 \|_\Lambda M_2$ є наступні переходи:

– внутрішній перехід першого процесу $(s_0,t_0) \xrightarrow{\tau} (s_1,t_0)$,

– внутрішній перехід другого процесу $(s_7,t_8) \xrightarrow{\tau} (s_7,t_0)$,

– комунікаційний перехід обох процесів $(s_1,t_0) \xrightarrow{\tau} (s_2,t_1)$.

$M = P_1 \| ... \| P_n$, де $P_1,...,P_n$ – РТС процесів РС.

1.2. Деякі приклади використання РТС

Сучасні вимоги до програмного і технічного забезпечення сучасних інформаційних систем та критичних IT-інфраструктур спонукають до розробки нових методів їх проектування, обґрунтування та коректної реалізації. Пропонований метод проектування ілюструється прикладами синтезу сервісів критичних IT-інфраструктур типу **PaaS** (*Platform as a Service*), **IaaS** (*Infrastructure as a Service*), **SaaS** (*Software as Service*).

IaaS зазвичай надає уніфіковані апаратні і програмні ресурси, але в деяких випадках і на інфраструктурному рівні для установки ПО з оплатою pay as you go (за мірою використання). Замовлена інфраструктура може динамічно масштабуватися. На базі такого підходу побудовані Amazon EC2 Service і Amazon S3.

PaaS надає більш високий рівень сервісу, що дозволяє розробляти, тестувати і впроваджувати власні застосунки.

Вбудована масштабованість накладає обмеження на тип розробляються. Яскравим прикладом реалізації такого підходу є сервіс Google App Engine.

SaaS пропонує готове спеціалізоване ПО, що веде до спрощення використання додатків і до зменшення витрат на розробку. Одним із чудових прикладів реалізації за таким підходом є Salesforce та її онлайнова система управління відносинами з клієнтами.

Оскільки в критичних ІТ-інфраструктурах зосереджені потужні і досить дорогі ресурси, виникає проблема їх ефективного використання. Це стає можливим за рахунок правильного проектування та реалізації критичної ІТ-інфраструктури, а в подальшому використанням оптимальних методів та алгоритмів розподілу, управління і диспетчерування ресурсів і навантаження на основі комплексу відповідних математичних моделей і методів.

Приклад 1. Синтез критичного процесу для критичної ІТ-інфраструктури[6,7]. Роботу, пов'язану з запуском критичного процесу, можна представити у вигляді взаємодії скінченної множини підсистем. У термінах транзиційних систем застосування можна представити у вигляді синхронного добутку наступних ТС:

1. а) *ТС 1..N* – інкапсулює дії, що виконуються винятково для пошуку та виділення певних потрібних ресурсів. Залежно від складності та розподіленості підсистема виділення конкретного ресурсу може бути як одиничною системою зі строго послідовними переходами, так і мати ієрархічну структуру. Основні дії, що належать до зони відповідальності ТС 1..N: а) пошук ресурсу; б) виділення ресурсу; в) використання ресурсу; г) повернення ресурсу в пул ресурсів. ТС у формальному вигляді можна представити таким чином:

$$A = (S, S^0, A, R, \Sigma, L) = (\{0,1,2,3\}, 0, \{ready, \text{search_res_A},$$
$$res_A_alloc, released\}, R, \Sigma, L\}$$

---

[6] Дорогий Я.Ю. Проектування критичних ІТ-інфраструктур з використанням розмічених транзиційних систем. *Материалы V заочной научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в современной науке»*. Харьков. 2017. Р. 48.

[7] Дорогий Я.Ю. Моделювання критичних ІТ-інфраструктур з використанням розмічених транзиційних систем. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції (І Міжнародний симпозіум «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях», PREDT-2017)*. 9-11 листопада. Чернівці. 2017.

Структура ТС представлена на рис. 2.

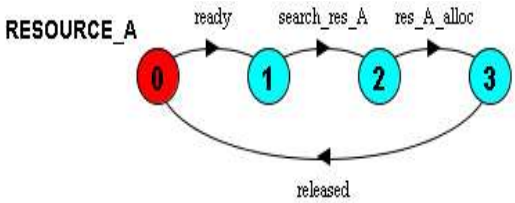


Рис. 2. Структура ТС виділення ресурсу

Множина станів така: 0 – початковий стан, 1 – стан готовності, 2 – ресурс знайдено, 3 – ресурс виділено, ресурс звільнено.

2. е) *ТС N+1* – інкапсулює дії, що виконуються винятково для запуску критичного процесу.

ТС у формальному вигляді можна представити таким чином:

$$A = (S, S^0, A, R, \Sigma, L) = (\{0,1,2,3,4,5\}, 0, \{ready, \text{res_A_alloc},$$
$$res_\text{B}_alloc, \text{proc_start}, \text{proc_killed}, released\}, R, \Sigma, L\}$$

Структура ТС для випадку використання двох видів ресурсу представлена на рис. 3.

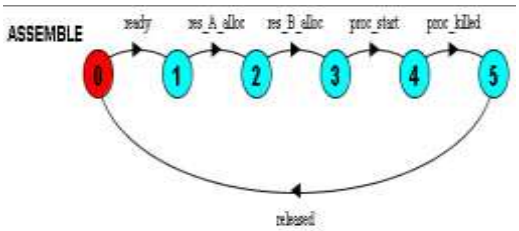


Рис. 3. Структура ТС запуску критичного процесу

Множина станів така: 0 – початковий стан, 1 – стан готовності, 2 – ресурс А виділено, 3 – ресурс В виділено, 4 – критичний процес запущено, 5 – критичний процес знищено, ресурси звільнено.

Результатом мінімізованої композиції ТС для випадку використання 2-х ресурсів буде наступна ТС (див. рис. 4):

$$A = (S, S^0, A, R, \Sigma, L) = (\{0..9\}, 0, A, R, \Sigma, L\},$$
$$\text{де } A = \{ready, search_res_A, search_res_B,$$
$$res_A_alloc, res_B_alloc, proc_killed, proc_start, released\}$$

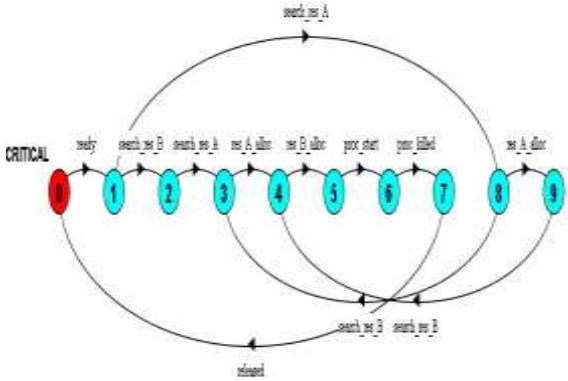


Рис. 4. Структура композиції ТС

Приклад 2. Взаємодія двох SAAS-систем (дуже спрощена модель).

Представимо нашу взаємодію систем у термінах ТС:

1. а) *ТС 1..2* – інкапсулює дії, що виконуються винятково для певних потрібних ресурсів. Основні дії, що належать до зони відповідальності ТС 1..2: а) отримання даних (ресурсу) з системи; б) запис даних (повернення ресурсу) в систему.

Структура ТС представлена на рис. 5.

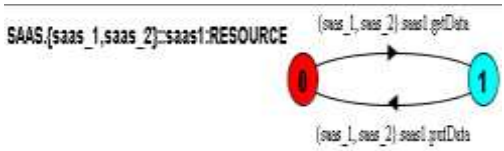


Рис. 5. Структура ТС 1..2

2. а) *ТС 3..4* – інкапсулює дії, що виконуються кожною системою SaaS при взаємодії з іншою. Основні дії, що належать до зони відповідальності ТС 3..4: а) отримання даних (ресурсу) з системи; б) запис даних (повернення ресурсу) в систему; в) обмін даними між системами; г) очікування (див. рис. 6).

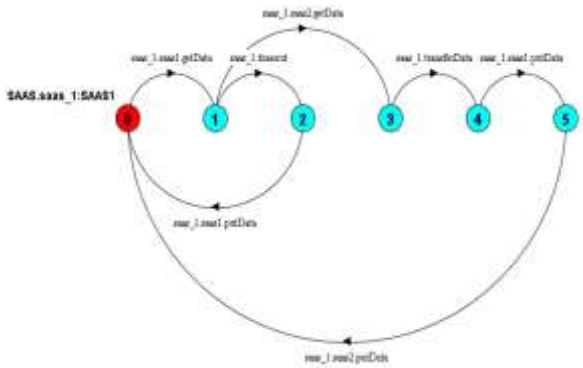


Рис. 6. ТС система SaaS

Мінімізована композиція ТС 1..4 дає можливість побачити взаємодію двох систем SaaS, яка включає взаємний обмін інформацією та її обробку (див. рис. 7).

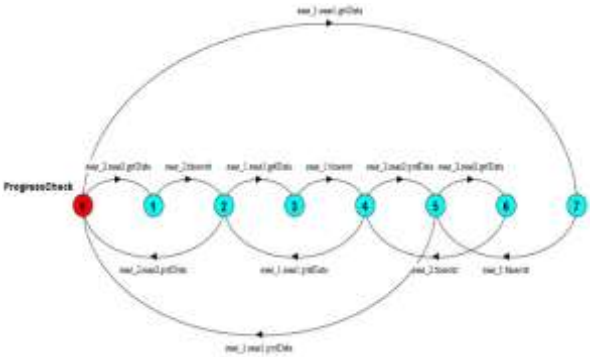


Рис. 7. Композиція ТС взаємодії систем SaaS

2. Представлення архітектури критичної ІТ-інфраструктури на базі розмічених транзиційних систем

У цій статті розглядається метод представлення архітектури критичної ІТ-інфраструктури, який отримав назву методу представлення та *обґрунтування дизайну критичної архітектури (Rationale and Evaluation of Critical Architecture Design, RECAD).*

RECAD має на меті допомогти архітекторам створювати та документувати архітектурний дизайн з акцентом на архітектурні рішення та обґрунтування проекту. RECAD охоплює три типи знань архітектури: проектні питання, проектні рішення та результати проектування. Ці об'єкти знань представлені стандартними об'єктами уніфікованого моделювання (UML). Проблема проектування – це матеріали, які впливають на прийняття дизайнерських / проектних рішень. Ця сутність інкапсулює такі поняття, як функціональні вимоги (наприклад, сценарії та діаграма співпраці), нефункціональні вимоги (наприклад, всі атрибути якості) та контексти проекту. Вона також фіксує інформацію про проектні рішення та обґрунтування проекту. Результати проектування включають в себе отримані рішення. Прикладами є класи, компоненти, інтерфейс та спосіб використання. Будь-який індивідуальний тип об'єкту архітектурного знання фіксується шляхом застосування заздалегідь визначеного тегового шаблону стереотипу. Концептуальна модель підходу представлена на рис. 8.

Фактично RECAD представляється ациклічним графом, який пов'язує елементи архітектури *CAE* з елементами обґрунтування архітектури *AR* за допомогою направленого відношення *ARtr*. *CAE* є критичним або не критичним архітектурним елементом, який приймає участь у *Рішенні* як вхідне значення (*Мотиваційна причина*) або як вихідне значення (*Результат дизайну*). AR енкапсулює результат *Обґрунтування архітектури* для *Рішення*. Оскільки *AR* має відношення типу 1:1 з *Рішенням,* для даного підходу він представляє точку прийняття рішення щодо обґрунтування архітектури. Відношення між *CAE* та *AR* представляється за допомогою направленої асоціації ARtr, яка є причинно-наслідковим зв'язком.

Означення 1.10. Модель RECAD – це РТС $RECAD = (CAE, CAE^0, AR, A, R, \Sigma, L)$, де *CAE* – множина вузлів, що представляють критичні та некритичні елементи архітектури, CAE^0 – підмножина CAE початкових станів елементів архітектури, *AR* – множина вузлів, які представляють обґрунтування архітектури, A – скінченна множина міток дій, Σ – множина змінних системи, L – функція розмітки елементів $L: CAE \to 2^{\Sigma}$, R – множина $R \subseteq (CAE \times AR) \cup (AR \times CAE)$ направлених зв'язків між вузлами, для якої виконуються такі умови:

1. Всі вузли AR повинні бути асоційовані з хоча б одною причиною та одним наслідком, тобто для $\forall r \in AR$ існує така причина $e \in CAE$, що $(e,r) \in R$ і існує такий наслідок $e' \in CAE$, що $(r,e') \in R$;

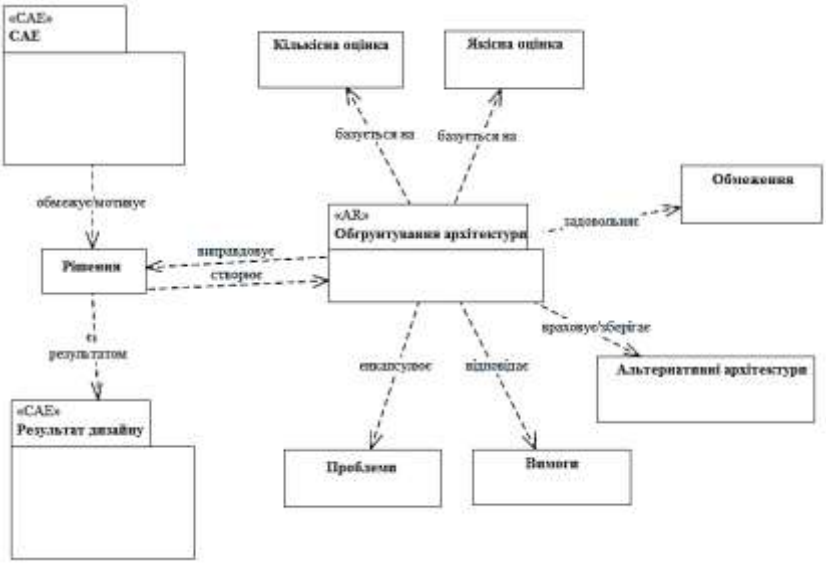


Рис. 8. Концептуальна модель RECAD

2. Не існує підмножини з множини *R*, яка утворює направлений цикл.

Основною формою модельної конструкції є шлях виду $\{\mathrm{CAE}_1, CAE_2, ...\} \to \mathrm{AR}_1 \to \{\mathrm{CAE}_a, CAE_b, ...\}$, де CAE_1, CAE_2 – входи, або причини рішення AR_1, а CAE_a, CAE_b – виходи, або наслідки цього рішення. На рис. 9 представлена UML діаграма, яка демонструє означену модельну конструкцію. Кратність відношень діаграми показує, що мотиваційні та результуючі CAE є непустими множинами, з'єднаними через єдиний елемент AR. Обмеження унікальності на діаграмі визначає, що кожний екземпляр CAE не може бути відображеним більше, ніж один раз.

Рис. 9. Причинно-наслідковий зв'язок між CAE **та** AR

Направлені зв'язки ARtr представляють причинно-наслідкові відношення. CAE призводить до AR через мотивацію або обмеження *Рішення,* AR своєю чергою генерує CAE типу *Результат дизайну*, маючи *Обґрунтування архітектури*. CAE може бути одночасно вхідним і вихідним, якщо використовується для двох *Рішень.* У якості вхідного він може представляти собою артефакт наступних типів: вимога, прецедент, клас, імплементація. Як вихідний – новий або переглянутий елемент дизайну.

В RECAD архітектурні елементи CAE є артефактами, які формують частини дизайну архітектури. Вони включають бізнес-потреби, які потрібно задовольнити, технічні та організаційні обмеження, що накладаються на проект архітектури, припущення, які потрібно перевірити, та об'єкти дизайну, які є результатом архітектурного проектування.

Елементи архітектури можуть також бути класифіковані за точками зору на архітектуру. Причина такої класифікації – мати можливість фокусуватись на різних аспектах проектного рішення. В цьому дослідженні, згідно з результатами аналізу ФОАП, використовуються точки зору на архітектуру підходу TOGAF. Для класифікації використано такі точки зору на архітектуру: бізнес-логіка, рівень даних, застосування, технології. А також додану нову точку зору на архітектуру, орієнтовану на критичні елементи.

На рис. 10 представлена UML-діаграма класифікації архітектурних елементів відповідно до точок зору на архітектуру. Бізнес-орієнтована точка зору на архітектуру включає архітектурні елементи, такі як функціональні та нефункціональні вимоги, бізнес-

середовище, середовище інформаційної системи, технологічне середовище. Це основні драйвери проектування архітектури.

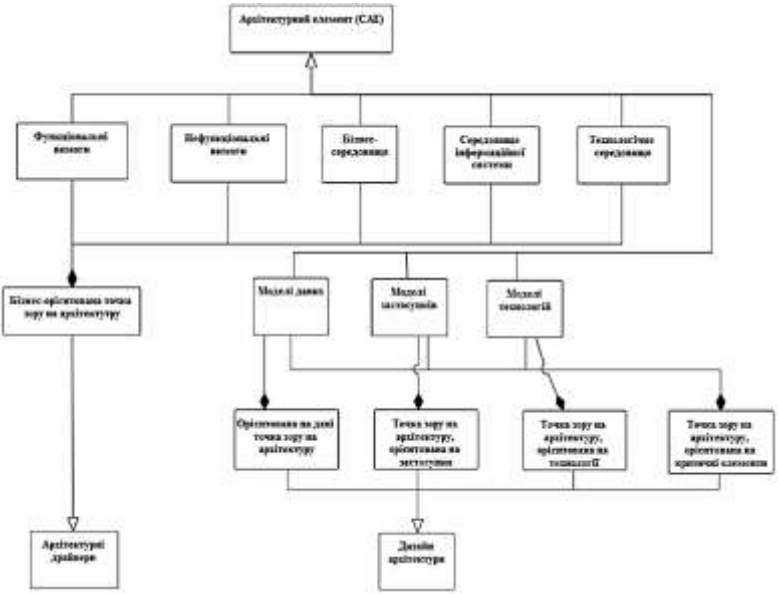


Рис. 10. UML-діаграма класифікації архітектурних елементів відповідно до точок зору на архітектуру

Архітектурний елемент як мотиваційна причина може бути представлений у вигляді:

– функціональних та нефункціональних вимог;

– припущень – документування невідомих або очікувань надає контекст для прийняття рішення;

– обмежень – можуть бути технічного, бізнес, організаційного або природного характеру;

– об’єктів дизайну – можуть впливати через свою поведінку на дизайн архітектури.

У вигляді результату дизайну архітектурний елемент може бути представлений як:

– об’єкти дизайну – можуть бути результатом рішення стосовно архітектури, які задовольняють певні мотиваційні причини;

– уточнені об’єкти дизайну – можуть бути уточнені в результаті прийняття відповідних рішень.

У цьому дослідженні передбачається, що бізнес-орієнтована точка зору включає вимоги та фактори середовищ. Створено п’ять категорій бізнес-орієнтованої точки зору на архітектуру, які описують різні аспекти впливу на архітектурний дизайн. Це і є архітектурні драйвери. Системні вимоги включають в себе функціональні та нефункціональні вимоги. Така класифікація дозволяє архітектору під час аналізу відслідковувати процес обґрунтування рішень до специфічних класів кореневих причин.

Елементи «Дизайн архітектури» є результатом процесу проектування. Вони класифіковані за наступними точками зору на архітектуру:

– орієнтовані на дані – отримані та використовувані застосунками;

– орієнтовані на застосунки – логіка обробки і структура програмного забезпечення, критичні та некритичні сервіси;

– орієнтовані на технології – технології та середовища, які використовуються для впровадження та розгортання системи, критичні та некритичні компоненти.

Підхід RECAD надає можливість використовувати три типи обґрунтувань архітектури: кількісний, якісний та за допомогою альтернативної архітектури. Якісне обґрунтування представляє процес обґрунтування та аргументи у текстовій формі, фактично, за та проти для кожного проектного рішення. Кількісне обґрунтування використовує різні критерії під час оцінювання проектних рішень. Третій тип передбачає документування та зберігання відкинутих альтернативних проектних рішень та їх подальший перегляд з метою оцінки достатності наявних параметрів оцінювання наявних архітектурних проектів, а також для майбутнього використання в інших проектах.

Слід зазначити, що архітектурне рішення може еволюціонувати з часом. Причиною цьому можуть бути як зміни в бізнес-процесах підприємства, так і зміни самого бізнес-середовища. Еволюціонуючи, можна втратити вихідний архітектурний проект та опис процесу обґрунтування рішень щодо цього проекту. Тому потрібно якимось чином зберігати всю історію еволюції проекту. Для цього пропонується використовувати розширену модель RECAD.

Означення 1.11. Розширена модель RECADe – це РТС $RECADe = (CAE, CAE^0, AR, A, R, \Sigma, L)$, на якій задана бієктивна функція відображення $SSf : (CAE \to CAE_h) \cup (AR \to AR_h)$ між архітектурними елементами або обґрунтуваннями архітектури, де:

$RECAD_{cur} = (CAE_{cur}, CAE^0_{cur}, AR_{cur}, A_{cur}, R_{cur}, \Sigma_{cur}, L_{cur})$ –

актуальна модель архітектури, і виконуються наступні умови:

– $CAE_{cur} \subseteq CAE$,

– $AR_{cur} \subseteq AR$,

– $A_{cur} \subseteq A$,

– $\Sigma_{cur} \subseteq \Sigma$,

– $CAE^0_{cur} \subseteq CAE^0$,

– $L_{cur} : CAE_{cur} \to 2^{\Sigma_{cur}}$,

– $R_{cur} \subseteq R \cap ((CAE_{cur} \times AR_{cur}) \cup (AR_{cur} \times CAE_{cur}))$,

– не існує підмножини з множини R_{cur}, яка утворює направлений цикл;

$RECAD_h = (CAE_h, CAE^0_h, AR_h, R_h, \Sigma_h, L_h)$ – історична модель архітектури, і виконуються наступні умови:

– $CAE_h \subseteq CAE$,

– $AR_h \subseteq AR$,

– $A_h \subseteq A$,

– $\Sigma_h \subseteq \Sigma$,

– $CAE^0_h \subseteq CAE^0$,

– $L_h : CAE_h \to 2^{\Sigma_h}$,

– $R_h \subseteq R \cap ((CAE_h \times AR_h) \cup (AR_h \times CAE_h))$;

– не існує підмножини з множини R_h, яка утворює направлений цикл;

і для яких виконуються наступні умови:

1. $CAE_h = CAE \setminus CAE_{cur}$,
2. $AR_h = AR \setminus AR_{cur}$,
3. $A_h = AR \setminus A_{cur}$,
4. $\Sigma_h = \Sigma \setminus \Sigma_{cur}$,
5. $CAE^0_h = CAE^0 \setminus CAE^0_{cur}$,
6. $L_h = L \setminus L_{cur}$.

На рис. 11 представлена відповідна модель UML-діаграма.

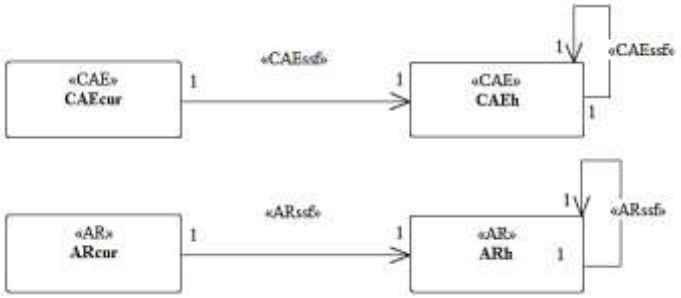


Рис. 11. UML-діаграма розширеної моделі RECADe

Імплементація підходу RECAD за допомогою UML. Для імплементації архітектурного елементу *CAE* визначено новий стереотип <<CAE>>. Цей стереотип розширює можливості UML-конструктів типу «об’єкт» та «клас» щодо підтримки властивостей відстежуваності та критичності. Це означає, що до існуючих конструктів додаються додаткові характеристики та атрибути з метою покращення процесу обґрунтування рішень. Додаткові атрибути стереотипу <<CAE>> імплементовані як теговані значення (tagged values):

– *elementID* – унікальний ідентифікатор архітектурного елементу;

– *elementVersion* – ціле число, яке ідентифікує версію архітектурного елементу і використовується для моделі CARELe;

– *elementType* – тип елементу відповідно до введеної класифікації за точками зору на архітектуру;

– *elementSubType* – підтип елементу відповідно до введеної класифікації за точками зору на архітектуру;

– *currFlag* – прапорець актуальності елементу (“Y” – остання версія, “N” – історична версія);

– *criticalFlag* – прапорець критичності елементу (”Y” – критичний елемент, “N” – некритичний елемент);

– *lastUpdateDateTime* – час останньої модифікації елементу;

– *author* – автор змін;

– *documentLocation* – місце розташування будь-яких зовнішніх документів, які описують елемент.

Під час перевірки відстежуваності параметри *elementType* та *elementSubType* дозволяють обирати фокус, щодо якого потрібно провести дослідження архітектури. Параметри *elementVersion* та *currFlag* дозволяють відстежувати процес еволюції архітектури, *criticalFlag* – критичність елементів та процесів.

З метою моделювання бізнес-орієнтованих точок зору, які містять вимоги, фактори середовищ та припущення використовується створений стереотип <<CAE>> для розширення елементів UML, таких як клас, об’єкт, артефакт та прецедент (рис. 12).

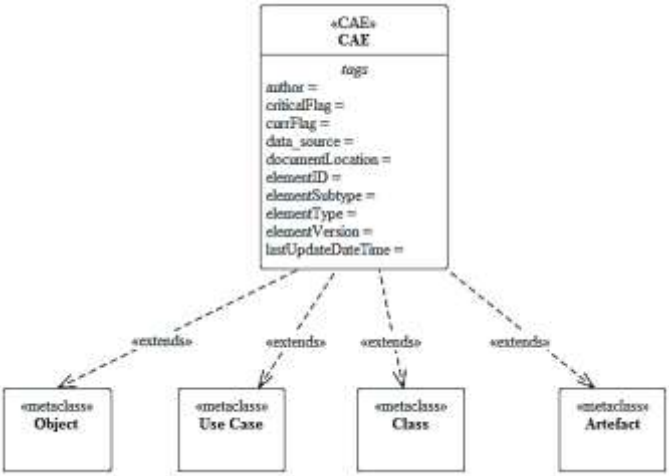


Рис. 12. Розширення елементів UML стереотипом <<CAE>>

Використання таких елементів дозволяє створювати моделі з різними точками зору на архітектуру.

Для імплементації елементу «*обґрунтування рішення*» використано стереотип <<AR>>, який розширяє можливості UML-конструкту «Пакет». Додаткові атрибути стереотипу <<AR>> імплементовані як теговані значення:

– *arID* – унікальний ідентифікатор елементу «Обґрунтування архітектури»;

– *currFlag* – прапорець актуальності елементу (“Y” – остання версія, “N” – історична версія);

– *criticalFlag* – прапорець критичності елементу (”Y” – критичний елемент, “N” – некритичний елемент);

– *lastUpdateDateTime* – час останньої модифікації елементу;

– *author* – автор особи, яка приймає рішення.

На рис. 13 представлена UML-діаграма взаємозв’язків стереотипів <<AR>> та <<AAR>>. Їх імплементація базується на конструкті «Пакет». AR може включати нуль або більше елементів AAR (обґрунтування альтернативної архітектури) залежно від кількості відкинутих альтернативних проектних рішень.

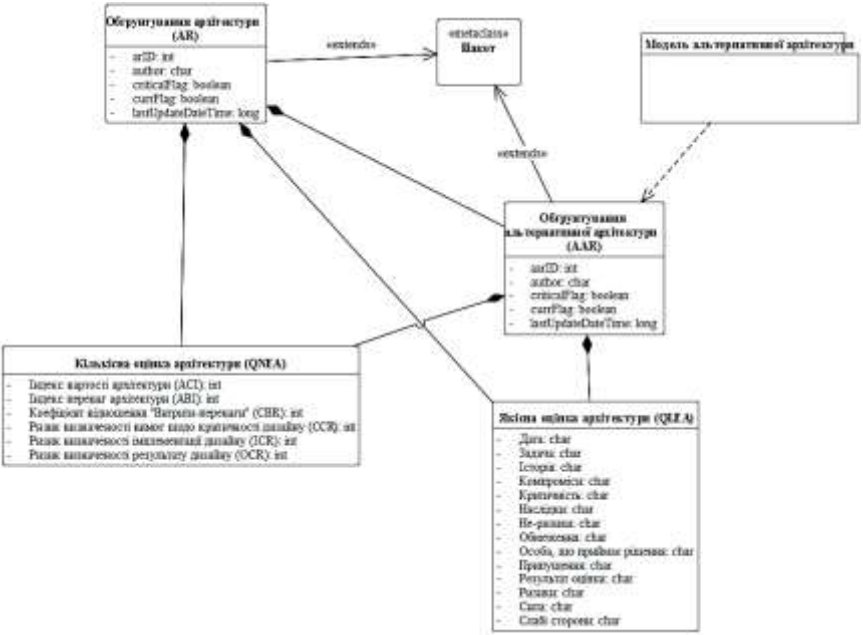


Рис. 13. UML-діаграма взаємозв’язків стереотипів <<AR>> та <<AAR>>

Стереотип <<AAR>> надає шаблон для документування альтернативних проектних рішень, які були відкинуті.

Відношення між *CAE* та *AR* представляється за допомогою направленої асоціації з новоствореним стереотипом <<ARtr>>.

Введені моделі RECAD та RECADe дозволяють представити та описати окремі конкретні проектні рішення щодо систем,

компонент та процесів, які входять до архітектури критичної ІТ-інфраструктури.

Визначимо для моделі RECAD її асинхронну паралельну композицію (Означення 1.12).

Означення 1.12. Нехай задані РТС

$RECAD_1 = (CAE_1, CAE_1^0, AR_1, A_1, R_1, \Sigma_1, L_1)$

та $RECAD_2 = (CAE_2, CAE_2^0, AR_2, A_2, R_2, \Sigma_2, L_2)$

такі, що

$CAE_1 \cap CAE_2 = \varnothing, AR_1 \cap AR_2 = \varnothing, \ A_1 \cap A_2 = \varnothing, \Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \varnothing.$

Нехай також задана синхронізаційна пара

$\Lambda = (\Delta, \bar{\ }), \Delta \subseteq A_1, \bar{\ } : \Delta \to A_2.$ Тоді модель

$RECAD = (CAE, CAE^0, AR, A, R, \Sigma, L) = \quad = RECAD_1 \parallel_\Lambda RECAD_2$

називається паралельною композицією

РТС $RECAD_1$ і $RECAD_2$, якщо:

– вірні співвідношення

$CAE = CAE_1 \times CAE_2, AR = AR_1 \times AR_2, S^0 = S_1^0 \times S_2^0,$

$A = A_1 \cup A_2 \setminus (\Delta \cup \bar{\Delta}), \ \Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2,$

– вірно $L : CAE \to 2^\Sigma, \ L((cae_1, cae_2)) = L(cae_1) \cup L(cae_2),$

– відношення

$R \subseteq ((CAE_1 \times CAE_2) \times A \times (AR_1 \times AR_2)) \cup ((AR_1 \times AR_2) \times A \times (CAE_1 \times CAE_2))$

задається наступним чином: $((s,u), a, (t,v)) \in R$ тоді і тільки тоді, коли виконується одна з трьох умов:

а) виконується перехід першої моделі: $(s,a,t) \in R_1, u = v$;

б) виконується перехід другої моделі: $(u,a,v) \in R_2, s = t$;

в) виконується синхронний обмін повідомленнями: $(s,b,t) \in R_1, (u,b,v) \in R_2, a = \tau$.

Таким чином, модель архітектурного рішення критичної ІТ-інфраструктури можна представити наступним чином (Означення 1.13).

Означення 1.13. Модель архітектурного рішення критичної ІТ-інфраструктури визначається у вигляді паралельної композиції всіх окремих проектних рішень щодо систем, компонент та процесів, які входять до архітектури критичної ІТ-інфраструктури, заданих у вигляді РТС RECAD, тобто: $M = RECAD_1 \parallel_{\Lambda_1} .. \parallel_{\Lambda_{n-1}} RECAD_n$, де $RECAD_1, ..., RECAD_n$ – відповідні РТС, $\Lambda_1, ..., \Lambda_{n-1}$ – задані на моделі пари синхронізації.

3. Верифікація моделей на базі РТС

У методах верифікації моделей (ВМ) специфікації РС зазвичай задаються за допомогою формул темпоральної логіки **Указан недопустимый источник.**. Формули темпоральної логіки описують тимчасові властивості обчислень (послідовностей переходів) моделі. Найбільше застосування в методі ВМ отримали логіки дерев обчислень (Computational Tree Logic, CTL), лінійного часу (Linear Time Logic, LTL) і узагальнення обох логік – логіка CTL⋆. Огляд методів верифікацій моделей наведено в роботі[8].

Задача верифікації моделей архітектурних рішень критичних ІТ-інфраструктур. Задача верифікації моделей архітектурних рішень критичних ІТ-інфраструктур формулюється наступним чином:

Задача 1.1. Дана модель архітектурного рішення $M = P_1 \| ... \| P_n$, де $P_1, ..., P_n$ – РТС RECAD критичної ІТ-інфраструктури. Задана формула (специфікація) φ темпоральної логіки відносно змінних моделі М. Необхідно перевірити виконуваність формули φ моделі М (позначається як $M \models \varphi$).

Задача верифікації параметризованих моделей архітектурних рішень критичних ІТ-інфраструктур.

У цій роботі розглядається узагальнення проблеми верифікації моделей. Методи верифікації застосовуються до моделей КІТІ, представлених у вигляді UML-діаграм, що складаються з кінцевої множини елементів архітектури та обґрунтувань, заданих у вигляді РТС. Як зазначалося у вступі, існують КІТІ, число процесів в яких залежить від початкової конфігурації або настройки КІТІ, а множина таких конфігурацій нескінченна. При цьому число процесів не змінюється під час роботи. Для КІТІ, в яких число процесів залежить від початкової конфігурації, можуть бути побудовані моделі з кінцевим числом станів для кожної початкової конфігурації системи. Оскільки множина початкових конфігурацій нескінченна, то і множина моделей архітектурних рішень з різним числом процесів нескінченна. Верифікація декількох, випадково обраних моделей, з цієї множини не гарантує виконуваність специфікації на всіх моделях множини. Для таких систем

[8] Dorogyy Y.A SURVEY OF PARAMETRIC MODEL VERIFICATION METHODS. *Scientific Journal «Science Rise*. 2020. Vol. 12. No. 41. pp. 42-47.

розглядається задача, яка в загальному випадку формулюється таким чином:

Задача 1.2. Дано нескінченне сімейство скінченних моделей архітектурних рішень КІТІ $\Upsilon = \{M_n\}$, параметризоване за параметром $n \in N$. Задана формула (специфікація) φ темпоральної логіки. Необхідно перевірити виконуваність формули φ на всіх моделях Υ, тобто $M_n \models \varphi$ для всіх n. Ця задача в літературі отримала назву верифікації параметризованих моделей (ВПМ).

Постановка задачі 1.2 потребує уточнення, оскільки в загальній постановці явно не вказується спосіб визначення сімейства F та специфікації φ. Тому фактично будемо розглядати наступний варіант задачі 1.2.

Задача 1.3. Дано нескінченне сімейство скінченних моделей архітектурних рішень КІТІ $\Upsilon = \{M_n\}$, параметризоване за параметром $n \in N$. Кожна модель $M_n = Q \| P_1 \| ... \| P_n$ складається з РТС фіксованої моделі RECAD Q та n екземплярів РТС альтернативних моделей P_i. Зафіксована кінцева множина $I \subseteq \Upsilon$ індексів альтернативних моделей, що спостерігаються, екземплярів прототипів P. Специфікація φ темпоральної логіки задається відносно змінних визначених моделей $P_i, i \in I$ та змінних моделі Q. Необхідно перевірити виконуваність формули φ на всіх моделях сімейства Υ, тобто $M_n \models \varphi$ для всіх .

Фактично, в постановці задачі 1.3 використовується лише одна фіксована модель та екземплярів прототипів . Можна розглядати варіант задачі, в якому присутні декілька фіксованих моделей та декілька альтернативних моделей , а модель , де . В деяких випадках ця задача зводиться до постановки задачі 1.3 за допомогою побудови РТС моделі у вигляді паралельної композиції моделей , а РТС прототипу у вигляді паралельної композиції РТС прототипів .

Запропонована постановка задач у вигляді (1.1-1.3) дозволяє застосувати для верифікації побудованих моделей широке коло формалізованих методів верифікації параметризованих моделей,

заданих у вигляді РТС. У цій роботі для верифікації побудованих моделей використано один з методів пошуку інваріантів[9].

4. Критерій оптимальності проектування та функціонування КІТІ

Під час аналізу процесу проектування нової критичної ІТ-інфраструктури потрібно враховувати:

– велику вартість та складність створюваної критичної ІТ-інфраструктури;

– наявність сучасних методологій, засобів та інструментів її створення.

Критична ІТ-інфраструктура повинна створюватись за наступними принципами:

– мінімізація чисельності необхідного людського професійного ресурсу та досягнення встановлених цілей експлуатації за мінімальних витрат цього ресурсу;

– мінімізація загальної тривалості робіт, які проводяться для критичної ІТ-інфраструктури;

– мінімізація часу зниження готовності критичної ІТ-інфраструктури;

– мінімізація часу відновлення готовності критичної ІТ-інфраструктури;

– мінімізація стороннього впливу під час проведення робіт з критичною ІТ-інфраструктурою;

– захищеність критичної ІТ-інфраструктури від можливих несанкціонованих дій;

– максимізація ефективності критичної ІТ-інфраструктури, її ресурсів та строку її служби.

Аналіз ІТ-інфраструктур та критичних ІТ-інфраструктур, цілей їх функціонування, структури та взаємозв’язків між елементами дозволяє визначити наступні основні їх особливості:

– наявність мети функціонування, що визначає її призначення та характер функціонування;

– наявність великої кількості різноманітних об’єктів управління;

– наявність ієрархічної структури управління;

---

[9] Konnov I. Parameterized Model Checking by Network Invariants: the Asynchronous Case. *LICS Workshop Algorithmics on Infinite State Systems*. Dubrovnik, Croatia. 2012.

– наявність мети та цілей управління для кожного підрівня ієрархічної структури;

– наявність великої кількості внутрішніх зв'язків у кожній підсистемі між її елементами;

– безперервна зміна стану функціонування елементів підсистем і системи в цілому, кількості її елементів та підсистем, критеріїв функціонування.

Оскільки в критичних ІТ-інфраструктурах зосереджені потужні і досить дорогі ресурси, виникає проблема їх ефективного використання. Це стає можливим за рахунок розподілу, управління і диспетчерування ресурсів, управління навантаженням на основі комплексу відповідних математичних моделей і методів. Формалізація проблеми ефективного використання ресурсів привела до задач нечіткого програмування[10] з широким вибором критеріїв оптимізації і врахуванням критичності, ресурсних, часових, технологічних та інших обмежень.

Для формування критерію оптимальності проектування і подальшого функціонування критичної ІТ-інфраструктури пропонується використати наступну множину параметрів[11]:

– доступність – визначає можливість мати доступ до всіх наявних ресурсів з будь-якої точки в будь-який час;

– надійність – визначає можливість безперервного користування наявним функціоналом критичної ІТ-інфраструктури;

– живучість – визначає можливість виконувати свої функції у разі втрати ресурсів, підсистем тощо;

– забезпеченість – визначає показник максимальної кількості процесів та сервісів, що обслуговуються;

– відновлюваність – визначає показник тривалості відновлення готовності до експлуатації;

– економічність – визначає показник витрат різноманітних ресурсів на забезпечення функціонування критичної ІТ-інфраструктури;

---

[10] Liu B. Theory and Practice of Uncertain Programming. UTLAB, 2009.

[11] Дорогий Я.Ю., Дорога-Іванюк О.О. Критерій оптимальності побудови критичної ІТ-інфраструктури. *Актуальні проблеми розвитку науки і техніки: Матеріали другої міжнародної науково-технічної конференції*, 20 грудня. Київ. 2015. P. 10.

– безпечність – визначає показник неможливості виконання несанкціонованих дій, спрямованих на порушення роботи критичної ІТ-інфраструктури чи її частин;

– адаптивність – визначає можливість критичної ІТ-інфраструктури динамічно реагувати та адаптуватися до змін у бізнес-процесах, наявних ресурсах і таке інше;

– строк життя;

– ефективність – визначає можливість поєднання вищезгаданих параметрів в кожному окремому випадку під визначену задачу.

Під час формування вимог критерію проектування критичної ІТ-інфраструктури необхідно також враховувати особливості розв'язуваних нею задач. Слід зазначити, що визначення всієї множини параметрів не можна повністю звести до системи формалізованих процедур, бо деякі з них вимагають якісного аналізу. Для такого аналізу слід використати метод структуризації, який дозволяє поділити задачу на підзадачі, визначитись за допомогою експертів або без них з методами розв'язання цих підзадач, обмеженнями використання цих розв'язків та методами поєднання розв'язків.

Враховуючи викладені аспекти та стадії життєвого циклу критичної ІТ-інфраструктури, пропонується особливо звернути увагу на наступні питання під час створення критичної ІТ-інфраструктури:

– формування образу критичної ІТ-інфраструктури;

– визначення цілей, побудова дерева цілей та вибір шляхів їх досягнення, формування вимог та критерію оптимальності критичної ІТ-інфраструктури;

– оцінку альтернативних варіантів побудови критичної ІТ-інфраструктури;

– обґрунтування вибору архітектурних рішень.

Образ критичної ІТ-інфраструктури формується з врахуванням прогнозу її розвитку та наробіток. При цьому попередньо визначаються структура критичної ІТ-інфраструктури (тобто перелік її наявних та можливих складників, можливих конструктивних рішень і таке інше), умови експлуатації (перелік характеристик, що визначають умови використання; фактори зовнішнього середовища, що впливають на функціонування, і так далі).

Наступний крок – визначення цілей функціонування системи. На даному етапі потрібно врахувати вимоги замовника, стан технічного та наукового розвитку в даній галузі. На базі ітеративного процесу визначення цілей функціонування будується дерево цілей та шляхів їх досягнення, яке покриває всі елементи системи та етапи їх експлуатації. Виконується оцінка можливості досягнення поставлених цілей. Побудоване дерево дає можливість визначити основні вимоги до критичної ІТ-інфраструктури, а також можливі рекомендації по конструктивним рішенням окремих підсистем та елементів.

Для визначення найбільш ймовірного варіанту побудови критичної ІТ-інфраструктури потрібно:

– оцінити можливість якісного стрибка в розвитку на базі нових технічних ідей;

– оцінити можливість розвитку на базі попередніх рішень шляхом покращення окремих характеристик.

Підсумовуючи все вищесказане, пропонується визначити досяжність поставлених перед критичною ІТ-інфраструктурою цілей шляхом визначення узагальнених показників (про деякі з них згадувалось вище).

Узагальнені показники визначаються за допомогою відповідних математичних моделей, які будуються для кожної критичної ІТ-інфраструктури.

Задача побудови критичної ІТ-інфраструктури належить до задач багатокритеріального аналізу і в загальному випадку має наступний вигляд:

$$U_{opt} = opU(x) \tag{1}$$

де:

U_{opt} – оптимальне рішення;

$x = \{x_i \mid i = 1..n\}, x \in D_{x_i}$ – вектор експлуатаційних параметрів, а D_{x_i} – множина обмежень цих параметрів;

$U = \{U_i \mid i = 1..n\}, U \in D_{U_i}$ – вектор узагальнених експлуатаційних вимог, а D_{U_i} – підмножина їх допустимих значень;

op – оператор оптимізації.

Під час оцінки ефективності роботи критичної ІТ-інфраструктури на ранніх стадіях створення потрібно враховувати витрати на реалізацію, оскільки наявність ресурсів обмежена.

В загальному випадку для кожного окремого випадку функціонування критичної ІТ-інфраструктури задача зводиться до пошуку компромісу між необхідними характеристиками функціонування. Наприклад, в одному випадку вимагається максимальна безпека функціонування, а всі інші характеристики не такі важливі, в іншому – потрібно забезпечити максимальну надійність функціонування.

ВИСНОВКИ

У цій статті представлений детальний опис методу представлення архітектури критичної ІТ-інфраструктури на базі розширених конструктів UML, наведено основні базові елементи математичного апарату розмічених транзиційних систем, використаних для опису моделей даного методу представлення архітектури у формалізованому вигляді. Запропонований метод дозволяє представити сам процес відображення процесу міркувань щодо архітектури критичної ІТ-архітектури в досить зручний спосіб та дає можливість досліднику накопичувати історію цих міркувань. Також представлена адаптація задачі верифікації параметризованих моделей, яка дозволяє застосувати для верифікації моделей архітектурних проектів, представлених у вигляді UML-діаграм і формалізованих у вигляді РТС математичний апарат темпоральних логік і, як результат, дозволяє використовувати для розв’язання цієї задачі широке коло різноманітних методів верифікації моделей без їх значного доопрацювання та модифікації.

АНОТАЦІЯ

У статті розглядаються питання, пов’язані з проблемою представлення проектних рішень щодо архітектури критичної ІТ-інфраструктури.

По-перше, наведено опис математичного апарату розмічених транзиційних систем, основні означення, який використано для визначення математичних моделей представлення архітектури критичної ІТ-інфраструктури. Наведені деякі приклади використання цього математичного апарату для представлення складних систем і процесів.

По-друге, в статті наведено детальний опис методу застосування розширених UML-діаграм для представлення проектних рішень щодо архітектури критичної IT-інфраструктури. Описані основні його елементи та спосіб переходу від UML-діаграм до формалізованих математичних моделей на базі розмічених транзиційних систем.

Запропоновано спосіб використання раніше створених методів верифікації параметризованих моделей шляхом визначення нової постановки задачі верифікації, яка дозволяє це зробити.

По-третє, визначено критерій оптимальності побудови критичної IT-інфраструктури.

Результати, викладені в статті, допоможуть дослідникам і розробникам архітектури критичних IT-інфраструктур вибрати найбільш придатний варіант стратегії прийняття рішень під час проектування власної архітектури, а також ознайомитися з критеріями її проектування та оцінки, з способами представлення проектних рішень. Варто мати на увазі, що не існує універсального підходу, який би підійшов для розробки будь-якої архітектури, тому так важливо визначити слабкі та сильні сторони кожного з них на етапі проектування системи, а також критерії проектування. Від того, наскільки вірно було визначено ці критерії, буде залежати і вибір конкретних технологій, і програмного забезпечення, а також успішність проектування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. P. 610.

2. Tanenbaum A., van Steen M. Distributed Systems: Principles and Paradigms. Upper Saddle River: Create Space Independent Publishing Platform, 2016. P. 704.

3. van Steen M., Tanenbaum A.S. A brief introduction to distributed systems. *Computing*. 2016. № 98 (10). С. 967–1009.

4. Теленик С.Ф., інш. Методы исследования свойств высокопроизводительных инфраструктур. Обзор. *Фундаментальные и прикладные проблемы информатики и информационных технологий*. 2015. № 1. С. 3–13.

5. Крывый С.Л., Максимец А.Н. Верификация программ: состояние, проблемы, результаты. *Кибернетика и системный анализ*. 2013. Т. 49. С. 3–14.

6. Дорогий Я.Ю. Проектування критичних ІТ-інфраструктур з використанням розмічених транзиційних систем. *Материалы V заочной научной конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в современной науке»*. Харьков. 2017. Р. 48.

7. Дорогий Я.Ю. Моделювання критичних ІТ-інфраструктур з використанням розмічених транзиційних систем. *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції (І Міжнародний симпозіум «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях», PREDT-2017)*. 9-11 листопада. Чернівці. 2017.

8. Dorogyy Y. A SURVEY OF PARAMETRIC MODEL VERIFICATION METHODS. *Scientific Journal "Science Rise"*. 2020. Vol. 12. No. 41. pp. 42–47.

9. Konnov I. Parameterized Model Checking by Network Invariants: the Asynchronous Case. *LICS Workshop Algorithmics on Infinite State Systems*. Dubrovnik, Croatia. 2012.

10. Liu B. Theory and Practice of Uncertain Programming. UTLAB, 2009.

11. Дорогий Я.Ю., Дорога-Іванюк О.О. Критерій оптимальності побудови критичної ІТ-інфраструктури. *Актуальні проблеми розвитку науки і техніки: Матеріали другої міжнародної науково-технічної конференції*, 20 грудня. Київ. 2015. Р. 10.

Information about author:
Dorogyy Ya. Yu.,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor in Department of Automation
and Control in Technical Systems
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute"
37, Victory av., Kyiv, 03056, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.8

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВОДОРАЗРУШАЕМЫХ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Кудрявцев П. Г.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных отраслях народного хозяйства широкое применение нашли водоразрушаемые формообразующие элементы, используемые при намотке изделий из полимерных композиционных материалов, при литье металлов и пластмасс. Под термином «композиционный материал» обычно понимают структурно-неоднородные системы, полученные в результате смешения нескольких разнородных компонентов и обладающие свойствами, отсутствующими у исходных материалов. В соответствии с этим определением, к композитам можно отнести все гетерогенные системы, представляющие собой сочетания двух и более химических веществ или различных фаз, при этом между фазами в композиционном материале должны наблюдаться четко обозначенные границы раздела. К таким материалам относятся и водоразрушаемые формообразующие элементы. Основное применение эти материалы нашли при изготовлении ракетных двигателей на твердом топливе.

Ракетные двигатели на твердом топливе (РДТТ) являются одним из наиболее важных типов ракетных двигателей, имеющих широкое практическое применение. Они используются в ракетной, ракетно-космической и авиационной технике. Жидкостные баллистические ракеты как в США, так и в России вытесняются твердотопливными ракетами, и в настоящее время они полностью заменили ракеты с ЖРД, занимая теперь монопольное положение в этом классе вооружения[1].

РДТТ используют в летательных аппаратах многих типов: баллистических ракетах, космических системах и ракетах-

[1] Лавров Л.Н., Думин О.С., Соколовский М.И. и др. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе / Под общ. ред. чл. корр. РАН, д.т.н., проф. Л.Н. Лаврова Москва : Машиностроение, 1993. 215 с.

носителях, крылатых ракетах и самолетах, зенитных и авиационных ракетных комплексах. РДТТ используются как в качестве основных маршевых двигателей ракет, так и в качестве вспомогательных двигателей для управления различными летательными аппаратами, отделения ракетных ступеней и отдельных блоков, для торможения и мягкой посадки, аварийного спасения космических кораблей и индивидуальных капсул пилотов.

Основным конструктивным элементом РДТТ является корпус двигателя. Корпуса РДТТ могут иметь различную форму: цилиндрическую, коническую, сферическую, овалоидную или тороидную. Возможны и комбинированные формы корпуса. Корпус может быть цельным или разъемным, разделенным на секции, имеющие отъемные днища. В качестве современных материалов корпуса применяют стеклопластики, органопластики, углепластики. В ряде случаев используются комбинации различных материалов.

Силовая оболочка корпуса в виде кокона может иметь форму овалоида вращения, шара, оболочки с цилиндрической (конической) частью и днищами различной формы. Диаметр переднего полюсного отверстия оболочки корпуса в виде кокона определяют исходя из необходимости размещения узлов воспламенителя, аварийного выключения, телеметрии и так далее. Диаметр заднего полюсного отверстия определяется условиями компоновки соплового блока и корпуса. Кроме того, эти отверстия являются технологическими элементами при изготовлении корпусов методом намотки.

Развитие этой области техники связано с разработкой и широким внедрением новых конструкционных материалов, среди них важное место занимают волокнистые композиционные материалы. Непрерывная силовая намотка – один из наиболее распространенных и высокоэффективных методов создания композиционных оболочек вращения. Технологической оснасткой при их изготовлении методом намотки являются формообразующие конструкции или оправки. При этом лента, образованная системой нитей, пропитывается полимерным связующим и с заданным первоначальным натяжением укладывается на оправку. Уникальные свойства неметаллических композиционных материалов позволяют не только существенно повысить качество конструкции РДТТ, уменьшить пассивную массу, но и уменьшить стоимость и трудоемкость изготовления.

Конструкции корпусов типа кокона образуются в процессе их намотки из композиционных материалов. Варьируя соотношением кольцевых и спиральных слоев, усиливая (армируя) тканями,

металлической фольгой, специально намотанными салфетками, изменяя ширину ленты, угол намотки, натяжение ленты, степень армирования (рисунок намотки, крепления слоев), можно варьировать требуемые свойства конструкции в широком диапазоне. При создании таких корпусов необходимо учитывать зависимость характеристик композиционного материала от физико-механических свойств теплозащитного и герметизирующего покрытий внутренней поверхности корпуса, конструкции и материала оправки (оснастки) для изготовления корпуса.

При проектировании корпуса следует учитывать усадочные характеристики материала силовой оболочки, технологической оснастки и теплозащитных покрытий. Такие воздействия происходят как в процессе намотки, в процессе отверждения материала корпуса двигателя, так и в процессе изготовлении заряда. Эти воздействия имеют достаточно большую длительность (до 30 суток), тепловое (50–70°С) и силовое (2,0–3,0 МПа) воздействие, и при изготовлении двигателя происходит усадка используемых материалов [2].

Силовая оболочка простейших корпусов типа кокона (Рисунок 1) является несущим элементом конструкции и представляет собой тело вращения (с днищами и цилиндрической частью). Она изготавливается методом намотки армирующего материала на специально подготовленную оправку. Для намотки используются нити, жгуты или ленты, пропитанные связующим компонентом. Полученная таким образом конструкция подвергается дальнейшей термообработке для отверждения и упрочнения связующего компонента.

---

[2] Соколовский М.И. Развитие конструктивно-компоновочных схем крупногабаритных ракетных двигателей твердого топлива. *Известия Российской Академии наук. Энергетика*. № 2, 2003, с. 97; Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. Москва : Машиностроение, 1987; Суходоева А.А. Численный анализ напряженно-деформированного состояния и оценка прочности оправок для намотки композиционных оболочек. Пермь : ПГТУ, 2000.

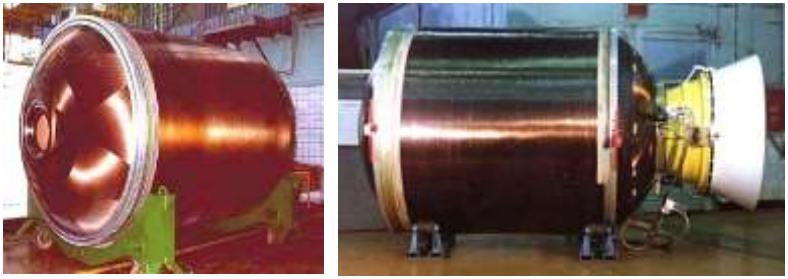


Рисунок 1. Цельномотанный органопластиковый корпус типа «кокон» маршевого двигателя РДТТ 15Д291 третьей ступени ракет 15Ж60 и 15Ж961 разработки и производства НПО «Искра», Пермь

Силовая оболочка корпусов типа кокона формируется спиральной намоткой, цилиндрическая часть ее усиливается тангенциальными слоями намотки. В полярных отверстиях силовой оболочки за счет адгезионных соединений крепятся закладные фланцы.

С учетом сказанного выше важной проблемой при изготовлении изделий типа кокона является конструкция и материал оправки. Для обеспечения технологичности конструкций, изготавливаемых из стеклопластиков, органопластиков или углепластиков методом намотки, обычно используются многоразовые оправки, изготовленные из металлов и пластмасс. Однако использование таких оправок для изготовления цельномотанных изделий весьма затруднено по конструкционным соображениям. Поэтому такие оправки обычно используются для изготовления отдельных элементов кокона, таких как цилиндрический корпус и закругленные крышки. Такой подход чаще используется при изготовлении не очень ответственного емкостного оборудования, используемого в гражданских целях. Для РДТТ секционный подход используется редко, так как наличие стыковочных швов приводит к резкому снижению прочности всей конструкции, а использование металлических фланцев приводит к увеличению коэффициента массового совершенства – отношения массы конструкции к массе заряда твердого топлива. Например, для крупногабаритных РДТТ уровень массового совершенства для верхних ступеней ракет составляет не более 0,08.

Оправка, в свою очередь, должна обеспечивать заданную форму и размеры изготавливаемой конструкции в условиях контактного давления со стороны формирующейся оболочки. Оправка должна иметь следующие свойства:

– иметь простую форму;

– иметь минимальное число разъемов, накладных или дополнительных вкладышей;

– также позволять снимать отвержденную деталь;

– обеспечивать осесимметричную форму детали без резких перепадов по толщинам.

Эти параметры обеспечивают равномерную усадку и устраняют деформацию готового продукта.

Конструкция корпуса РДТТ с его элементами должна позволять применение таких оправок, на которых разгрузочные манжеты зарядов (законцовки, уменьшающие концентрации напряжений по концам твердотопливного заряда) и внутренние теплозащитное покрытие могут изготавливаться в едином технологическом процессе изготовления корпуса РДТТ, то есть не требуют отдельной приклейки перечисленных элементов на готовый корпус.

При этом следует всегда учитывать, что в отличие от металлических конструкций, где обнаруженные после изготовления дефекты (например, в сварных швах) могут устраняться, качество готового стеклопластикового корпуса изменить уже нельзя. Это предъявляет исключительные требования к намоточным технологическим процессам, применяемому оборудованию, оснастке технологического процесса. При создании материала для оправки следует учитывать усадочные характеристики материала силовой оболочки и теплозащитных покрытий.

Такие требования могут быть обеспечены только оправками, изготавливаемыми из композиционных материалов. При этом они должны обладать уникальным объединенным комплексом химических и физико-механических свойств, таких как высокая прочность, высокая упругость, малый коэффициент термического расширения и одновременно легкая растворимость в воде. Это свойство особенно важно для удаления оправки из готового корпуса типа «кокон», после проведения всех технологических процессов. Перспективным направлением по созданию материалов для изготовления оправок является разработка водоразрушаемых

материалов, обладающих высокой прочностью и способных легко и быстро разрушаться под действием воды.

Наибольшее развитие на российских предприятиях ракетно-космической отрасли получили оправки на основе композиционного материала из кварцевого песка и связующего поливинилового спирта. Поливиниловый спирт (ПВС), полученный из поливинилацетата, является тактическим полимером. Кристалличность ПВС обусловлена наличием большого числа гидроксильных групп в полимере. На кристалличность полимера также оказывают влияние предыстория получения полимера, разветвленность, степень гидролиза и тип распределения остаточных ацетатных групп. Чем выше степень гидролиза, тем выше кристалличность образца ПВС. При термической обработке полностью омыленного продукта его кристалличность повышается и приводит к снижению его растворимости в воде. Чем выше число остаточных ацетатных групп в ПВС, тем меньше образование кристаллических зон. Исключением для растворимости является аморфный ПВС. Ввиду малой исходной кристалличности полимер (независимо от молекулярной массы) хорошо растворяется в воде [3].

Однако их существенным недостатком являлось то, что после термического воздействия во время технологического процесса изготовления корпуса РДТТ происходила частичная деструкция поливинилового спирта, результатом которой являлось значительное снижение его растворимости в воде. При этом почти не удалось повысить скорость растворения за счет повышения температуры, а обработка ее с помощью струи перегретого водяного пара также не давала большого эффекта. Иногда процесс размывания оправки затягивался почти на неделю.

Решить эту проблему удалось двумя способами. Одним из способов явилось создание композиционных материалов на основе жидкого стекла, отверждаемого при нормальных условиях за счет удаления влаги. Второй способ основан на использовании растворимых в воде химических соединений для создания такого композита.

К материалам для изготовления водоразрушаемых формообразующих элементов предъявляются следующие основные требования: высокая прочность при повышенных температурах

---

[3] Бойко В.В. Синтез поливинилового спирта в водно-спиртовых средах : дис. канд. хим. наук. 02.00.06 : Москва, 2004, 112 с.

эксплуатации (до 200°С и выше), хорошая размываемость водой или водными растворами поверхностно-активных веществ, технологичность изготовления элементов, не дефицитность и не токсичность компонентов. Решающее влияние на качество намотанного изделия и на коэффициент реализации прочностных свойств полимерных композиционных материалов оказывают следующие характеристики материалов, используемых для изготовления водоразрушаемых формообразующих элементов: прочностные, упругие, деформационные, теплофизические и так далее.

В результате экспериментальных исследований по определению уровня контактных давлений и анализа напряженно-деформированного состояния в системе «формообразующий элемент (оправка) – оболочка» был сформирован комплекс необходимых характеристик материала для водоразрушаемых формообразующих элементов.

В нашей предыдущей работе сделан подробный анализ технологии изготовления водоразрушаемых формообразующих изделий, например, литейных стержней, применяемых при литье металлов и пластмасс, а также изделий типа «кокон» и корпусов ракетных двигателей на твердом топливе[4]. Было показано, что они могут быть использованы для изготовления водорастворимых оправок, применяемых при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки или выкладки с использованием связующих, требующих повышенных температур отверждения и в условиях механических напряжений. Проведен анализ возможного использования различных водоразрушаемых материалов для создания подобных изделий. Проанализированы свойства водоразрушаемых композиционных материалов на основе жидкого стекла и возможности их использования для изготовления оправок. На основе проведенного анализа сделан выбор основы для изготовления основы для изготовления оправок на основе водоразрушаемых материалов. Проведен анализ физико-механических свойств галогенидов щелочных металлов и произведен обоснованный выбор веществ основы, подходящих для изготовления водоразрушаемых композиционных материалов.

[4] Kudryavtsev P. Composite materials for manufacture of water destroyable form-forming equipment. *Journal "Scientific Israel- Technological Advantages".* Vol. 20, № 1, 2018, pp. 40–45, ISSN: 1565-1538.

Предложена рецептура и технология изготовления изделий из водоразрушаемых материалов. Проведен анализ процессов при разрушении этих материалов после их использования.

Таким образом, становятся актуальными разработка научных основ получения материалов для изготовления водоразрушаемых формообразующих элементов с заданными свойствами и поиск методов целенаправленного регулирования их свойств. Опыт предыдущих исследований показывает, что такие разработки возможны на основе представлений физико-химической механики дисперсных структур. Начало развитию исследований в этом направлении было положено в работах П.А. Ребиндера и его школы[5].

1. Водоразрушаемые композиционные материалы на основе жидкого стекла для изготовления оправок

Натриевое жидкое стекло широко применяется в литейном производстве для изготовления литейных форм и различных формовочных смесей. Для проведения экспериментов было использовано высокомодульное натриевое жидкое стекло с силикатным модулем n=2.7÷3,0 и выше, плотность стекла 1400÷1420 *кг/м*^{3}. Процесс отверждения жидкого стекла сопровождался проявлением адгезионных свойств к наполнителю кварцевому песку и осуществлялся при естественном (на воздухе) или искусственном (нагревом, продувкой теплого воздуха) высушивании смеси. В отличие от изготовления литейных форм[6], в данном процессе старались максимально избежать разрушения жидко-стекольной основы, чтобы в дальнейшем не уменьшить растворимость его в воде.

Кроме этого, для достижения высокой прочности такого материала необходимо добиваться наиболее плотной упаковкой зерен песка. Для

---

[5] Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика: Избр. тр. Москва : Химия, 1979; Абрамсон А.А. и Щукин Е.Д. (ред.). Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества. Москва : Химия, 1984.

[6] Жуковский С.С., Лясс А.М. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей. Москва : Машиностроение, 1978. 24 с.; Корнеев В.И., Юргинсон Е.Н., Кузьмин Б.А. Опыт разработки и применения связующих для легковыбиваемых формовочных смесей. Ленинград : ЛДНТП, 1986. 26 с.; Kudryavtsev P., Figovsky O. Advanced Nanomaterials Based on Soluble Silicates. *Journal Scientific Israel - Technological Advantages,* Vol. 16, № 3, 2014, p. 38-76.

этого, помимо давления формования, требуется использование наполнителя с определенным распределением зерен по размерам и использование жидкого стекла с оптимальной вязкостью. При этом для получаемых материалов их прочность зависит от содержания жидкого стекла в системе. Эта зависимость проходит через острый максимум, и ее вид представлен на Рисунке 2.

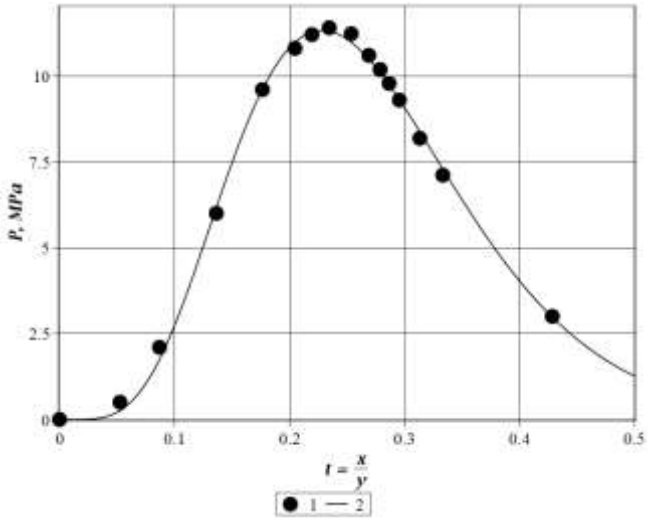


Рисунок 2. Зависимость предела прочности на разрыв композиционного материала от содержания жидкого стекла ($Na_2O{\cdot}3{,}3SiO_2$, ρ = 1,39 *г/см*^{3}) в утрамбованной вибрацией смеси с кварцевым песком (0,625 *мм*) после сушки до постоянного веса при 130°C: P – Разрушающее напряжение при сжатии для образцов композиционного материала, МПа. *x* – содержание жидкого стекла в композиции, масс. %; *y* – содержание кварцевого песка, масс.%. 1 – экспериментальные точки; 2 – аппроксимирующая функция

Для повышения технологичности изготовления материала и повышения скорости его растворения после использования необходимо снижение содержания жидкого стекла в композиции, при одновременном сохранении ее прочностных свойств. В связи с этим были применены дополнительные действия для увеличения плотности композиции. Максимальная плотность была достигнута применением полидисперсной песчаной смеси, снижением

концентрации жидкого стекла и применением метода прессования сырой смеси при давлении 1,0÷1,2 *МПа*. Данные действия позволили снизить содержание жидкого стекла в композиции.

Таким образом, была разработана композиция следующего состава: кварцевый песок 87%, молотый кварцевый песок 8%, жидкое стекло 5%. Прочность полученного композиционного материала после высушивания составила 5÷8 *МПа*, при испытании на изгиб. После изготовления корпуса РДТТ оправку удавалось вымыть в течение нескольких часов.

Наиболее существенным путем улучшения разрушаемости жидкостекольных композиций, применяемых для изготовления оправок, является снижение содержания жидкого стекла в исходной смеси. Опыт производства показал, что улучшение разрушаемости таких смесей становится заметным при снижении массовой доли жидкого стекла в смеси от 6÷8 до 3% и менее. Такое снижение содержания связующего жидкого стекла в смеси, без ухудшения ее прочностных свойств возможно при условии повышения вяжущих свойств связующего или разработке новых вяжущих композиций на его основе.

Основными путями снижения содержания жидкого стекла в композициях являются:

– повышение стабильности состава и свойств жидкого стекла;

– повышение качества формовочных песков, прежде всего с позиций содержания пылевидных фракций;

– применение специальных приемов активации поверхности зерен кварцевого песка, обеспечивающих проявление высокопрочных адгезионных контактов на границе «жидкое стекло – кварц»;

– оптимизация технологических приемов приготовления смесей с позиций обеспечения полного и своевременного взаимодействия компонентов смеси. Сюда входит последовательность введения компонентов, способы их введения и так далее;

– совершенствование аппаратурного оформления, которое обеспечивает тщательное смешение компонентов смеси при низком содержании жидкого стекла и низкой влажности приготавливаемой смеси;

– обеспечение условий равномерного распределения давления при прессовании изделий, что особенно важно для крупногабаритных изделий;

– направление улучшения разрушаемости композиций на основе жидкого стекла включает принципиальное изменение состава и физико-химической природы жидкого стекла. Реализация такого

подхода возможна за счет перехода в область высокомодульных жидких стекол (полисиликатов), со значением силикатного модуля 4÷10 и снижения содержания примесей кальция и алюминия.

В качестве перспективной модифицирующей добавки, для создания композиционных материалов на основе жидкого стекла предложены технические лигносульфонаты[7]. Наши исследования показали, что лигносульфонаты оказывают существенное воздействие на процессы твердения и структурирования композиций на основе жидкого стекла. Они улучшают прочностные показатели материала. Введение в состав жидкого стекла 3% лигносульфонатов с повышенными молекулярными массами приводит к получению тонкопористой структуры формирующегося геля, высокой водонепроницаемости, прочности материала и достижению высоких эксплуатационных показателей.

Однако связующие материалы на основе жидкого стекла в обычных условиях на воздухе отверждаются необратимо[8], в результате взаимодействия щелочной силикатной составляющей с CO_2 воздуха. Проблема ухудшения растворимости композитов, после завершения всех технологических циклов, была решена с использованием в качестве основы композита – галогенидов щелочных металлов.

2. Выбор основы для изготовления основы для изготовления оправок на основе водоразрушаемых материалов

Как известно, все галургические производства имеют большую проблему, связанную со слеживаемостью минеральных солей, особенно при их транспортировке. Слеживаемость – это свойство порошкообразных веществ, характеризующее их склонность к переходу в связанное, уплотненное состояние[9]. Прочность брикета соли называется степенью слеживаемости. Ее величину обычно измеряют в единицах давления (*кПа*), при котором монолитный образец определенной формы разрушается. Слеживаемость зависит от гранулометрического состава, влажности вещества, наличия примесей и других факторов. Минимальная влажность вещества, выше которой продукт может слеживаться, обычно составляет от

---

[7] Lebo, S.E., Gargulak, J.D. and McNally, T.J. Lignin. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Son, (2001).

[8] Kudryavtsev P., Figovsky O. Advanced Nanomaterials Based on Soluble Silicates. *Journal Scientific Israel - Technological Advantages*, Vol. 16, № 3, 2014, p. 38–76.

[9] Терещенко А.Г. Гигроскопичность и слеживаемость растворимых веществ. Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 79 с.

0,05 до 1 масс.%. Гигроскопические процессы и процессы слеживаемости растворимых веществ являются двумя сторонами одного и того же массообменного процесса, в котором участвуют газовая, жидкая и твердая фазы.

Слеживаемость – это свойство дисперсного вещества, связанное с процессом переноса воды из межкристаллитной жидкой фазы в газовую фазу, при одновременном выделении из жидкой фазы твердого вещества в зоне контакта отдельных кристаллов. Таким образом, кристаллические мостики между кристаллами растворимого вещества возникают только при высушивании вещества. Явление слеживаемости определяется не влажностью продукта, а десорбцией влаги из влажного продукта. Избыточная влажность продукта – это только необходимое условие процесса слеживаемости. Механизм слеживаемости через образование кристаллических мостиков при прохождении гигроскопических процессов является основным для растворимых веществ. Однако на этот основной процесс могут накладываться и другие реакции. Например, возможно образование солевых мостиков при охлаждении влажного продукта. Также возможно влияние химических реакций, продолжающихся после изготовления продукта, в том числе связанных с образованием кристаллогидратов. Большой эффект оказывает увеличение площади контакта между гранулами за счет мелкодисперсной фракции. Кроме того, слеживаемость может возникать в результате деформации частиц соли под действием механических нагрузок и разрушения частиц под действием внешних усилий и другое.

Существует большое количество работ, посвященных борьбе с этим эффектом[10]. Однако мы решили усилить этот эффект и

---

[10] Терещенко А.Г. Гигроскопичность и слеживаемость растворимых веществ, Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 79 с.; Хамский Е.В. Кристаллические вещества и продукты. Методы оценки и совершенствования свойств. Москва : Химия, 1986, 224 с.; Волков В.А. Разработка технологии основ неслеживемости хлорида калия. Автореферат канд. дисс., Ленинград, 1986.; Пойлов В.З. Основы технологий некоторых кристаллических продуктов с заданными свойствами. Автореферат докт. дисс., Пермь, 1998; Черепанова М.В., Потапов И.С., Пойлов В.З., Попова К.В., Алиферова С.Н. Влияние условий хранения и транспортировки на физико-механические свойства гранулированного хлорида калия. *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология.* 2012. №13.; Zurimendi J., Bolivar C.; Rafael A. Anti- caking composition. United States Patent № 4,772,308, Current International Class: B01J 2/30; C05C 1/02; C05C 1/00; C05G 003/00; C05C 001/02; C05C 003/00. 20.09.1988; Юркина М.И. Исследование процесса устранения слеживаемости хлористого калия с помощью добавок ферроцианида и аминов : автореферат канд. дисс., Пермь, 1974.

использовать его для создания водоразрушаемых конструкционных композиционных материалов. Выбирая конкретные основы для изготовления материалов оправок, необходимо учитывать следующие факторы. Используемые для этих целей соли не должны образовывать кристаллогидраты. Это обусловлено тем, что кристаллогидраты способны выделять воду при достаточно низких температурах и соответственно растворяться в своей же кристаллогидратной воде. Такой эффект характерен, например, для Глауберовой соли, мирабилита – $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$[11]. Другим недостатком кристаллогидратных солей является возможность их гидролиза и большая усадка при потере воды. Еще одним недостатком некоторых солей, который исключает возможность их применения в качестве основы для изготовления оправок, является наличие фазовых переходов при температурах в диапазоне от комнатной до температуры эксплуатации.

Таким образом, соли, которые пригодны для такого использования, должны быть достаточно дешевыми и широко распространенными в природе. Кроме того, они должны иметь высокую растворимость в воде. Такими свойствами обладают вещества, имеющие преимущественно ионную кристаллическую решетку. Из множества подобных соединений можно выделить группу галогенидов щелочных, щелочноземельных металлов и аммония. Однако из этой группы мы удалим галогениды щелочноземельных металлов, так как последние обладают высокой гигроскопичностью и образуют множество кристаллогидратов. Это свойство, как мы уже отмечали, является недостатком при решении поставленной задачи.

В настоящее время природа механических свойств ионных кристаллов изучена значительно лучше, чем каких-либо других кристаллов. Одна из причин хорошего понимания свойств ионных кристаллов это простая природа химической связи, которая обуславливает их структуру и свойства. Другая – заключается в том, что пластическую деформацию в этих кристаллах можно было изучать очень детально путем непосредственного наблюдения наличия и движения дислокаций в их структуре. Пластическое течение и хрупкое разрушение являются гетерогенными процессами, поэтому, измерением только гомогенных механических параметров, таких, как напряжение, деформация и скорость деформации, невозможно достичь существенного понимания этих

[11] Hill, J.C. Johann Glauber's discovery of sodium sulfate. Sal Mirabile Glauberi. *Journal of Chemical Education.* 1979, Vol.56, No 9, p. 593.

явлений. Для того чтобы правильно связать гомогенные параметры с явлениями атомного масштаба, необходимо иметь возможность изучать неоднородности – дислокации и трещины – сами по себе. Большой прогресс в этой области был достигнут еще в конце прошлого века[12]. Некоторые свойства ионных кристаллов обусловлены тем, что они состоят из локально заряженных ионов, однако большая часть механических свойств, имеет прямую аналогию со свойствами металлических и ковалентных кристаллов.

Силы связи в идеальном ионном кристалле являются исключительно электростатическими, так что наиболее устойчивыми структурами оказываются плотно упакованные решетки типа хлористого натрия или решетки типа хлористого цезия. Кроме того, так как силы связи зависят только от расстояния между ионами и не зависят от углов между соседями, упругие постоянные должны подчиняться соотношениям Коши для линейных деформаций 35[13]. Этот факт сужает число интересующих нас веществ до нескольких щелочно-галоидных кристаллов, включая NaCl. Однако мы не будем полностью ограничиваться этим списком, а рассмотрим некоторое количество щелочно-галоидных кристаллов и несколько других кристаллов, которые имеют решетку типа хлористого натрия. Кристаллы галогенидов рубидия и цезия рассматриваться не будут вследствие того, что они сравнительно мало исследованы и не могут быть применены для наших целей ввиду своей редкости и дороговизны.

Свойства щелочно-галоидных кристаллов изучены достаточно хорошо. Такие величины, как энергия связи и упругие постоянные, могут быть рассчитаны с приемлемой точностью из свойств атомов, составляющих эти кристаллы. Упругие постоянные являются наиболее важными механическими параметрами кристаллов, так как от них зависят все другие механические свойства. Например, у кристаллов с малым модулем упругости обычно трудно ожидать большого сопротивления пластическому течению.

Энергия кристаллической решетки определяется балансом сил притяжения и отталкивания ионов, образующих данную решетку. Основную часть энергии связи этих кристаллов составляет простое электростатическое взаимодействие между ионами, а изменение

---

[12] Гилман Дж., Механические свойства ионных кристаллов. *Успехи физических наук*. 1963 т. 80, вып. 7, с. 455–503.

[13] Коробов В.И., Очков В.Ф. Химическая кинетика. Введение с Mathcad/ Maple/MC5, М., Горячая линия –Телеком, 2009, 384 с.

электростатической энергии при деформации дает основной вклад в модули упругости. Стабильность структуры ионных кристаллов определяется балансом сил притяжения и отталкивания. Энергия отталкивания в ионных кристаллах возникает по двум причинам. Этими причинами являются силы отталкивания, которые появляются, когда электронные облака ионов начинают перекрываться при достаточно тесном сближении ионов друг с другом при образовании кристалла.

Первая причина заключается в том, что перекрытие электронных облаков должно приводить к уменьшению величины заряда отрицательного иона за счет каждого соседнего положительного иона и наоборот. Этот эффект уменьшает притяжение между ионами при уменьшении расстояния между ними.

Вторая причина заключается в том, что при перекрытии электронных облаков уменьшается объем, в котором могут двигаться электроны. Согласно принципу неопределенности Гейзенберга, это означает, что кинетическая энергия электронов должна возрастать, и таким образом полная энергия системы стремится увеличиться, вызывая отталкивание ионов.

Существует довольно хорошее согласие между результатами полуэмпирической теории Борна – Майера, квантово-механической теории и экспериментальными данными энергии сил связи в щелочно-галоидных кристаллах, приведенных в работах[14]. На рисунке 3 представлены эти данные в зависимости от обратной величины расстояния между ближайшими соседями в кристаллической решетке соответствующих галогенидов щелочных металлов.

Представленные на рисунке 3 данные указывают на существование хорошей обратно пропорциональной зависимости энергии сил связи обратной величины расстояния между ближайшими соседями в кристаллической решетке. Если энергию электростатического взаимодействия одного иона U_i в ионном кристалле представить, как было указано в работе [15], в виде

---

[14] Гилман Дж., Механические свойства ионных кристаллов, Успехи физических наук, 1963 т. 80, вып. 7, с. 455–503; Hearmon R.F.S. The Elastic Constants of Anisotropic Materials, Rev. Mod. Phys., 1946, Vol. 18, Issue 3, p. 409; Slaughter W.S. The Linearized Theory of Elasticity, Springer, 2002, 512 p. ISBN: 978-1-4612-6608-2

[15] Morris D.F.C., The lattice energies of the alkali halides, Acta Cryst. Vol. 9, 2, p. 197 (1956). doi: 10.1107/S0365110X56000498

уравнения в соответствии с законом Кулона, то получим выражение:

$$U_i = \frac{z_i e^2}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{j \neq i} \frac{z_j}{r_{ij}} \quad (1)$$

Где $r_{ij} = |r_i - r_j|$ расстояния между ионами i и j, z_j – заряд иона j, e – заряд электрона, ε_0 – электрическая постоянная.

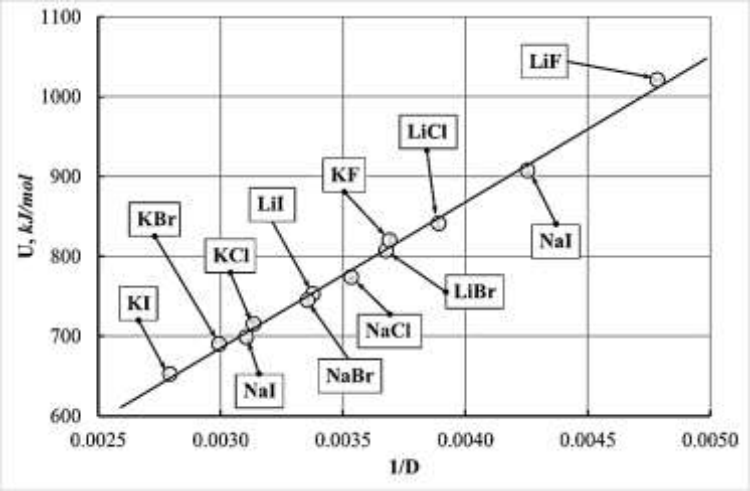


Рисунок 3. Корреляция энергии сил связи щелочно-галоидных кристаллов[16] от обратной величины расстояния между ближайшими соседями в кристаллической решетке ($D = r_{cat} + r_{an}$). Ионные радиусы взяты по шкале кристаллографических ионных радиусов в единицах *pm*[17]

При нормировке расстояния между ионами на величину расстояния между ближайшими противоположно заряженными ионами D (которое зависит от параметров кристаллической

[16] Гилман Дж., Механические свойства ионных кристаллов. *Успехи физических наук*. 1963 т. 80, вып. 7, с. 455–503; Hearmon R.F.S. The Elastic Constants of Anisotropic Materials, Rev. Mod. Phys., 1946, Vol. 18, Issue 3, p. 409.

[17] Harrison W.A. Solid State Theory. Dover Publications, Inc. New York, 1980. 541 p.

решётки, типа структуры кристалла и ионных радиусов структурных элементов), получим:

$$U_i = \frac{z_i e^2}{4\pi\varepsilon_0} \sum_j \frac{z_j}{r_{ij}/D} = \frac{z_i e^2}{4\pi\varepsilon_0 D} M \qquad (2)$$

где M – постоянная Маделунга.

Для кристаллической решётки типа NaCl, с зарядами ионов ±1 и координационным числом 6, константа Маделунга имеет величину M=1,747558. Для структур типа CsCl с координационным числом 8 она несколько выше и составляет величину M=1,763. Таким образом, для большинства галогенидов щелочных металлов должна соблюдаться обратно пропорциональная зависимость энергии сил связи от расстояния на расстояние между ближайшими разноименно-заряженными ионами. Этот факт и наблюдается на Рисунке 3.

Энергия сил связи является фундаментальной характеристикой, напрямую связанной с упругими постоянными и прочностными характеристиками кристаллов. Упругие постоянные можно грубо оценить следующим образом. Сила F, с которой один ион действует на другой, в зависимости от r – расстояния между ними, будет равна: $F = \frac{\partial U}{\partial r}$. Таким образом, напряжение будет примерно равно:

$$\sigma \sim \frac{1}{D^2} \frac{\partial U}{\partial r} \qquad (3)$$

При этом дифференциал напряжения в зависимости от r будет иметь вид

$$d\sigma = \frac{dr}{D^2} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right) \qquad (4)$$

Однако дифференциал напряжения представляет собой величину

$$d\sigma = E d\varepsilon, \qquad (5)$$

где E – модуль упругости; $d\varepsilon = \frac{dr}{D}$ дифференциал деформации. Отсюда получаем итоговое соотношение для модуля упругости

$$E = \frac{1}{D}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\right) \approx \frac{z_i e^2 M}{2\pi\varepsilon_0 D^4} = c \cdot D^{-4} \qquad (6)$$

Упругие постоянные являются наиболее важными механическими параметрами кристаллов, так как от них зависят все другие механические свойства. Например, у кристаллов с малым модулем упругости обычно трудно ожидать большого сопротивления пластическому течению и разрушению.

Значения упругих постоянных, определенные экспериментально, приведены в обзорах[18] и частично были измерены нами. На рисунке 4 представлены средние значения модулей упругости для кристаллов галогенидов щелочных металлов и аммония. Представленные данные были получены при комнатной температуре.

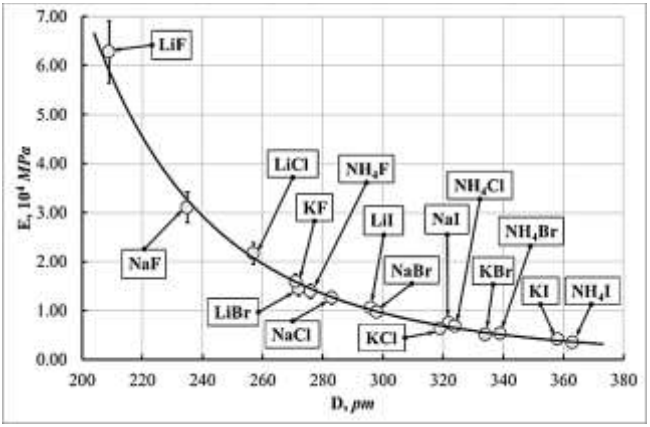


Рисунок 4. Зависимость модуля упругости кристаллов галогенидных солей щелочных металлов и аммония в зависимости от расстояния между ближайшими соседями в кристаллической решетке ($D = r_{cat} + r_{an}$). Ионные радиусы взяты по шкале кристаллографических ионных радиусов в единицах *pm*[19]

[18] Hearmon R.F.S. The elastic constants of anisotropic materials-II, Advances in Physics, 1956, Vol. 5, Issue 19, p. 323-382; Huntington H.B. The Elastic Constants of Crystals, Solid State Physics, 1958, Vol. 7, p. 213-351; Фурман А.А., Шрайбман С.С. Приготовление и очистка рассола, Москва, «Химия», 1966, 232 с.

[19] Harrison W.A. Solid State Theory. Dover Publications, Inc. New York, 1980. 541 p.; Brazhkin V.V., Grimsditch M., Guedes I., Bendeliani N.A., Dyuzheva T.I., Lityagina L.M. Elastic moduli and the mechanical properties of stishovite single crystals, Phys. Usp. Vol. 45, p. 447–448, 2002; DOI: 10.1070/PU2002v045n04ABEH001162

Представленные на рисунке данные могут быть аппроксимированы следующим выражением

$$E = a \cdot D^{-b} \tag{7}$$

Коэффициенты этого уравнения, рассчитанные по методу наименьших квадратов, имеют величину a=3,00·10^{+16}, b=5,05. Некоторое различие значений показателя степени от расстояния между ближайшими соседями в кристаллической решетке, полученной теоретически и на основе экспериментальных данных, указывает на то, что теоретические выкладки были сделаны с некоторыми допущениями и не учитывают всей полноты факторов, оказывающих влияние на механические свойства кристаллов галогенидных солей. Однако в целом данные результаты дают близкую тенденцию, так как различие в показателях степени в размере примерно 20% не является критичным. Поэтому на основе этих представлений можно уже сделать качественные предсказания поведения тех или иных веществ и осуществлять выбор веществ, подходящих для создания требуемых материалов.

В результате анализа представленных выше данных из огромного множества минеральных солей можно остановиться на двух их представителях. Такими подходящими солями являются хлориды натрия и калия. У этих солей достаточно хорошо изучены их механические и физические свойства, что дает хорошую перспективу для создания водоразрушаемых материалов на их основе.

Рассматривая вопрос изготовления материалов для оправок из композитов на основе галогенидов щелочных металлов, необходимо остановится на их механических и физико-химических свойствах. Механическим свойствам кристаллов галогенидов щелочных металлов, и, в частности, хлорида натрия, посвящено много работ. Еще А.Ф. Иоффе в своей работе[20] подробно обсуждал механические свойства хлорида натрия. Он обратил внимание на тот факт, что в наибольшем противоречии с предсказаниями электрической теории кристаллических решеток оказывается прочность твердых тел. Максимальная величина связи в кристаллах NaCl на основании теории кристаллических решеток получается порядка 3000 МПа для

[20] Иоффе А.Ф. Избранные труды. Том I. Механические и электрические свойства кристаллов. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Ленинград, 1974, стр. 1–327.

случая всестороннего растяжения. Одностороннее растяжение при комнатной температуре должно дать около 2000 МПа. Однако наблюденная прочность отдельных кристаллов NaCl на растяжение среднем составляет 4,3 МПа. Понижение температуры до температуры жидкого азота (−195,75°C) не влияет заметным образом на прочность каменной соли. Также она практически не изменяется при нагреве до 200°C (Рисунок 5).

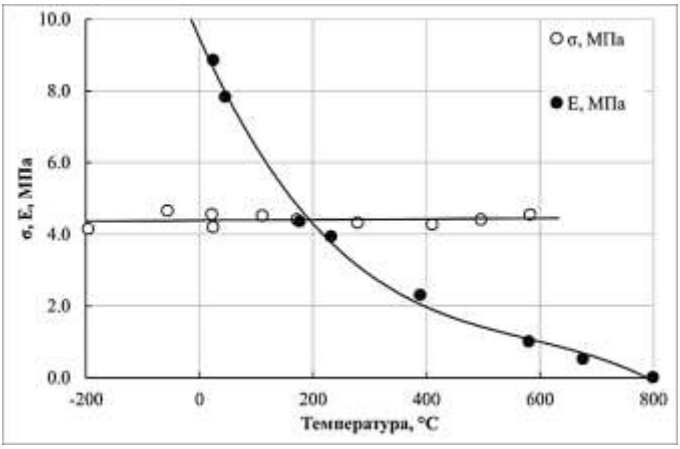


Рисунок 5. Температурная зависимость предела прочности (σ) и модуля упругости (E) кристаллов NaCl[21]

Следует обратить внимание на то, что в реальных материалах прочность измерялась не на одиночных кристаллах, а на кристаллических композициях. Это объяснялось тем, что при 200°C предел упругости кристалла падает до 4,3 МПа, то есть равен пределу прочности. Таким образом, при температурах выше 200°C предел упругости оказывается ниже предела прочности. При увеличении нагрузки вначале достигается предел упругости, и начинается пластическая деформация, нарушающая решетку кристалла. Как было обнаружено еще А.Ф. Иоффе, процесс пластической деформации значительно увеличивает прочность кристалла [22].

[21] Иоффе А.Ф. Избранные труды. Том I. Механические и электрические свойства кристаллов. Ленинград : Изд-во «Наука», 1974. стр. 1–327.

[22] См. [21]

Прочность одиночных кристаллов на растяжение примерно в 500 раз меньше, чем вычисленный максимум для сил сцепления, и разрыв наступает прежде, чем может быть замечено существенное отклонение от закона Гука. Даже пластически деформированные кристаллы обладают в 40 раз меньшей прочностью, чем следовало бы ожидать. Наблюдаемый разрыв при растяжении не имеет ничего общего с истинной прочностью. Можно легко понять, что постепенный частичный разрыв требует гораздо меньшей силы, чем разрыв одновременно по всему поперечному сечению. Допустим, например, что на боковой поверхности растянутого стержня существует малая, но очень резкая трещина. Распределение усилий будет таково, что на краю трещины усилие будет чрезвычайно концентрированным. Если радиус кривизны дна трещинки достаточно мал, отношение усилия у края трещины к среднему усилию на все поперечное усилие может оказаться весьма большим, что имеет место в реальном кристалле.

Если этим объясняется малая прочность кристаллов на растяжение, то, очевидно, состояние поверхности, с которой начинаются надрыв и разрушение образца, должно играть существенную роль: в таком случае необходимо найти еще объяснение тому факту, что наблюдаемая прочность на растяжение постоянна в пределах 10%. Влияние состояния поверхности на прочность каменной соли впервые было показано в[23]. Прочность кристаллов каменной соли зависит не только от ориентации усилия, но и от ориентации внешних поверхностей, ограничивающих кристалл.

А.Ф. Иоффе с сотрудниками обнаружили эффект, который в дальнейшем получил его имя[24]. Ими было обнаружено, что прочность кристаллов каменной соли значительно возрастала при их погружении в горячую воду. Предел прочности возрастал до 300 и даже до 1600 *МПа*. Эти значения уже близко подходят к теоретической прочности 2000 *МПа*. Прежде чем наступал разрыв, достигался предел упругости, соответствующий при комнатной температуре 9 *МПа*, и в

---

[23] Joffe A., Lewitzky M. Über die Kohäsionsfestigkeit von Steinsalz, Zeitschrift fur Physik. 1929, Bd. 35. S. 442-445.

[24] Иоффе А.Ф. Избранные труды. Том I. Механические и электрические свойства кристаллов. Изд-во «Наука», Ленингр. отд. Ленинград, 1974. стр. 1-327; Фурман А.А., Бельды М.П., Соколов И.Д. Поваренная соль. Производство и применение в химической промышленности. Москва : Химия, 1989. 272 с.; Schmid B., Boas W., Crystal Plasticity, Springer, Berlin, 1936.

момент, когда происходил разрыв, кристалл оказывался пластически деформированным. Измерявшаяся прочность была, таким образом, не прочностью одиночного кристалла, а прочностью поликристаллического образования. Тем не менее, этот результат является существенным, ибо он показывает, что внутренняя прочность каменной соли не меньше 1600 *Мпа,* и что кристаллы каменной соли могут выдержать подобные усилия.

А.Ф. Иоффе действие воды и эффекта растворения видел в следующем. При растяжении соли в воде растворяется ее поверхность. Растворение поверхности влечет за собой удаление поверхностных трещин и поверхностных дислокаций, на которых возникают локальные перенапряжения, ведущие к разрыву. Если удалить дефекты растворением, можно нагрузить кристалл до напряжений, превышающих его хрупкую прочность, и довести их до значений, соответствующих пределу упругости. При достижении напряжений, соответствующих пределу упругости, наступает пластическая деформация, сопровождающаяся большим удлинением и упрочнением материала. Растворение ведет к повышению величины хрупкой прочности до значения, соответствующего величине предела упругости. Повышенная пластичность соли в воде является следствием возможности перевода ее выше предела упругости[25].

Поверхностные условия не оказывают большого влияния на основной для пластичности фактор, а именно на подвижность дислокаций. Было обнаружено[26], что предел текучести кристаллов NaCl не чувствителен к поверхностным условиям, а напряжение, требуемое для движения дислокации в кристалле NaCl, не зависит от выдержки на воздухе, в воде и в масле[27]. Обработка поверхности влияет на наклон диаграммы напряжение – деформация в области деформационного упрочнения[28]. Важным выводом является то, что эффект Иоффе является следствием устранения больших

---

[25] Schmid B., Boas W., Crystal Plasticity, Springer, Berlin, 1936.

[26] Бугаенко Л.Т., Рябых С.М., Бугаенко А.Л. Почти полная система средних ионных кристаллографических радиусов и ее использование для определения потенциалов ионизации. *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия.* 2008, Т. 49, № 6, с. 363–385.

[27] Гилман Дж., Механические свойства ионных кристаллов. Успехи физических наук. 1963 т. 80, Вып. 7, с. 455–503.

[28] Бугаенко Л.Т., Рябых С.М., Бугаенко А.Л. Почти полная система средних ионных кристаллографических радиусов и ее использование для определения потенциалов ионизации. *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия.* 2008, Т. 49, № 6, с. 363–385.

поверхностных дефектов путем растворения кристалла. Если кристалл, предварительно смоченный, тщательно высушить, не дав ему реагировать с воздухом, он остается пластичным почти неограниченно долго. С другой стороны, если в массе присутствуют твердые частицы, то они могут быть центрами возникновения трещин в кристалле[29].

Эффект Иоффе также был нами использован при разработке водоразрушаемых конструкционных материалов. При этом этот эффект был дополнительно усилен за счет введения в состав композиции дополнительных веществ, которые выступают как поверхностно активные продукты, создавая на поверхности кристаллов соли защитную пленку. Также были введены добавки, которые изменяют свойства водно-солевых растворов, регулируя процесс кристаллизации соли при их выпаривании.

3. Водоразрушаемые композиционные материалы на основе галогенидов щелочных металлов для изготовления оправок

Авторами были запатентованы водоразрушаемые композиционные материалы на основе галогенидов щелочных металлов для изготовления оправок[30]. Реализация идеи, заложенной в данном патенте, позволяет повысить прочность формообразующих изделий. Это привело к снижению брака при производстве отливок и корпусов изделий типа «кокон». При этом удалось повысить удельное давление литья и намотки, тем самым была расширена номенклатура изготовляемых изделий. Применение новых материалов позволило снизить вес оправок, при сохранении заданных прочностных показателей. Кроме того, удалось снизить расход дорогостоящих материалов и улучшить экономические показатели производства.

Настоящая работа относится к материаловедению для машиностроения, а именно к изготовлению водорастворимых формообразующих изделий, например, литейных стержней, применяемых при литье металлов и пластмасс, и может быть использовано для изготовления водорастворимых оправок, применяемых при намотке или выкладке изделий из полимерных композиционных материалов с использованием связующих,

---

[29] См. [24]

[30] Кудрявцев П.Г. Журавлев С.Г., Ботов В.А., Клячкин Ю.С., Лавров Л.Н., Ипанова О.П., Новгородцева М.М., Шафит Я.М., Леонов А.А., Радушев А.В., Бегишев В.П. Композиция для изготовления водорастворимых формообразующих изделий, А.С. СССР № 1696097 по заявке № 4634416/33 от 9.01.89, опубл. Б.И. №45 от 07.12.91.

требующих повышенных температур отверждения. Целью работы является повышение прочности, снижение коэффициента температурного расширения состава и снижение стоимости изготовления соответствующих продуктов.

В качестве основы для создания материала была выбрана водорастворимая соль, хлорид натрия. В дополнение к водорастворимой соли разработанная композиция включает различные добавки, которые служат в качестве суперпластификаторов, высаливающих агентов, а в качестве растворителя композиция содержит воду.

По аналогии с бетонными смесями в состав разработанной композиции вводится суперпластификатор. Основной функцией суперпластификатора является значительное повышение подвижности готовой к применению смеси. Использование суперпластификаторов в составе разработанной смеси в комбинации с другими модифицирующими добавками позволяет создавать пластичные композиции, предназначенные как для вибрационного, так и для механического прессования готовых изделий.

В качестве суперпластификатора использованы модифицированные технические лигносульфанаты. Механизм действия суперпластификатора упрощенно можно представить следующим образом. Так как суперпластификаторы относятся к поверхностно активным веществам, то их основное свойство заключается в том, что молекулы таких веществ адсорбируются на поверхности частиц соли, образуя тонкий моно- или бимолекулярный слой, при этом уменьшается межфазовая энергия сцепления и облегчается дезагрегация частиц соли. При этом вода, входящая в состав композиции, играет роль пластифицирующей смазки. В дополнение к этому эффекту, адсорбированный слой сглаживает шероховатость частиц соли, уменьшая тем самым коэффициент трения между ними. Кроме того, в результате адсорбции суперпластификатор создает одноименный электрический заряд на поверхности частиц твердой фазы и исключает возможность их сцепления за счет электростатических сил и дополнительно снижает вязкость суспензии. В процессе дегидратации происходит рост кристаллов соли. При этом постепенно прекращается отталкивающее действие одноименных электрического заряда, и суспензия теряет подвижность, она твердеет.

Добавки лигносульфонатов выполняют в композиции несколько функций. Они одновременно являются суперпластификаторами и связующими. Как суперпластификаторы, лигносульфонаты

относятся к поверхностно активным веществам, и их основное свойство заключается в адсорбции на поверхности частиц соли, образуя тонкий моно- или бимолекулярный слой, при этом уменьшается межфазовая энергия сцепления и облегчается разрушение агрегатов, образованных частицами соли. При этом вода, входящая в состав композиции, играет роль пластифицирующей смазки. То, что лигносульфонаты еще выполняют и функцию связующего, стало понятно после их испытания при получении образцов на диоксиде кремния в качестве дисперсной фазы.

Использованные лигносульфонаты содержат в своем составе 85% основного вещества в виде солей лигносульфоновых кислот с катионом, соответствующим основанию, использованному при варке целлюлозы, и до 15% минеральных солей сернистой и серной кислот. Нами в экспериментах использовались технические лигносульфонаты с натриевым основанием производства Соликамского ЦБК по ОСТ 13-183-03 марки А. Лигносульфонаты или сульфированный лигнин представляют собой водорастворимые анионные полиэлектролиты. Они являются побочными продуктами производства древесной целлюлозы при использовании технологии сульфитной варки целлюлозы[31].

Большая делигнификация в сульфитной варке включает кислотное расщепление эфирных связей, которые соединяют многие компоненты лигнина[32]. Электрофильные карбокатионы,

---

[31] Gargulak, J. D., Lebo, S. E. and McNally, T. J. (2015). Lignin. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc (Ed.). doi:10.1002/0471238961.12090714120914.a01.pub3; Pang B., Yang S., Fang W., Yuan T.-Q., Argyropoulos D.S., Sun R.-C., Structure-property relationships for technical lignins for the production of lignin-phenol-formaldehyde resins, Industrial Crops and Products, Vol. 108. 2017. P. 316–326. ISSN 0926-6690. URL: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.009.

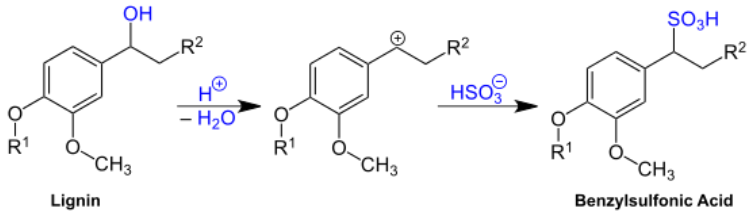
[32] Pang B., Yang S., Fang W., Yuan T.-Q., Argyropoulos D.S., Sun R.-C., Structure-property relationships for technical lignins for the production of lignin-phenol-formaldehyde resins, Industrial Crops and Products, Vol. 108, 2017, P. 316-326, ISSN 0926-6690. URL: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.009; Sjöström E., Chapter 4 - LIGNIN, In Wood Chemistry (Second Edition), Academic Press, San Diego, 1993, P. 71-89, ISBN 9780080925899, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092589-9.50008-5; Gellerstedt G., Henriksson G., Chapter 9 - Lignins: Major Sources, Structure and Properties, In Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources, edited by Mohamed Naceur Belgacem and Alessandro Gandini, Elsevier, Amsterdam, 2008, P. 201–224, ISBN 9780080453163. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00009-0.

полученные в ходе расщепления эфира, реагируют с ионами бисульфита (HSO_3^-), чтобы дать сульфонаты.

$$ROR' + H^+ \rightarrow R^+ + R'OH$$

$$R^+ + HSO_3^- \rightarrow R\text{-}SO_3H$$

Первичным местом для расщепления эфира является атом углерода боковой цепи, присоединенный к ароматическому кольцу. Приведенные ниже схемы структуры являются схематичными, так как лигнин и его производные являются сложными смесями полимеров. Группы R^1 и R^2 могут быть самыми разнообразными группами, встречающимися в структуре различных форм природного лигнина. Сульфирование происходит в боковых цепях, а не на ароматическом кольце[33]:



Лигносульфонаты имеют широкие диапазоны молекулярной массы и широкое молекулярное массовое распределение. Оно изменяется в диапазоне от 1000–140 000 *Дальтон.* Для лигносульфонатов хвойных пород средняя молекулярная масса молекул лигносульфонатов имеет более низкие значения, и более высокие для лиственных пород[34]. Такое строение молекул определяет свойства технических лигносульфонатов и характеризует их как анионактивные ПАВ. Технические

[33] Sjöström E., Chapter 4 - LIGNIN, In Wood Chemistry (Second Edition), Academic Press, San Diego, 1993, P. 71-89, ISBN 9780080925899, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092589-9.50008-5.

[34] Gargulak, J. D., Lebo, S. E. and McNally, T. J. (2015). Lignin. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc (Ed.). doi:10.1002/0471238961.12090714120914.a01.pub3; Sjöström E., Chapter 4 - LIGNIN, In Wood Chemistry (Second Edition), Academic Press, San Diego, 1993, P. 71-89, ISBN 9780080925899. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092589-9.50008-5.

лигносульфонатов проявляют связующие, клеящие, диспергирующие свойства, не токсичны, хорошо растворимы в воде[35].

Как известно, электролиты оказывают сильное влияние на растворимость неэлектролитов и, соответственно, неэлектролиты оказывают влияние на растворимость электролитов. Эти явления были описаны в многочисленных работах[36]. Они получили названия высаливания и всаливания. Таким образом, вводя в состав растворов электролиты, можно за счет этих эффектов уменьшить растворимость электролитов в воде и добиться ускорения их кристаллизации. Исследования влияния NaCl на растворимость различных веществ в воде показали, что высаливающее действие зависит и от природы неэлектролита. Различие в действии солей на неэлектролиты связано с ориентацией молекул воды в гидратной сфере иона. Когда катион образует гидратный комплекс, молекулы воды ориентируются таким образом, что протоны находятся снаружи комплексного иона. За счет водородных связей к этим протонам притягиваются молекулы неэлектролита[37]. Так, например, дипольный момент молекулы глицерина составляет величину μ = 2,56 Дб. Соответственно, для хлорида натрия высаливание составляет порядка 3,5%. Поскольку глицерин является распространенным, не дорогим и не токсичным продуктом, то он был выбран в качестве высаливающей добавки.

Кроме того, введение добавок лигносульфоната и глицерина в композицию позволяет усилить эффект А.Ф. Иоффе, который был описан выше. Вода в исходной композиции растворяет дефекты на поверхности кристаллов соли и залечивает микроскопические трещины, являющиеся концентраторами напряжений в материале. В свою очередь, пленка из лигносульфоната, образующаяся на поверхности кристаллов соли, защищает их от появления новых

---

[35] Расширение использования технических лигносульфонатов в народном хозяйстве: Материалы всесоюзного научно-технического семинара. Москва, 1967. С. 62; Чудаков М.А. Промышленное использование лигнина. Москва : Лесная промышленность, 1972. С. 62.

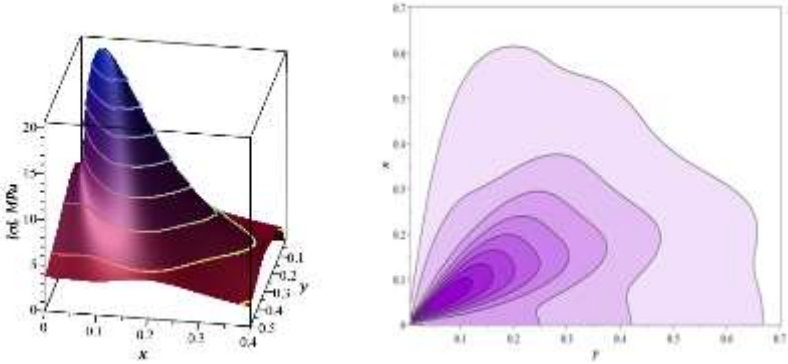
[36] Sergeeva V.F., Salting-out and salting-in of non-electrolytes, Russ. Chem. Rev., 1965, vol. 34, 4, p. 309–318. URL: https://doi.org/10.1070/RC1965v034n04ABEH001446.

[37] Sergeeva V.F., Salting-out and salting-in of non-electrolytes, Russ. Chem. Rev., 1965, vol. 34, 4, p. 309–318. URL: https://doi.org/10.1070/RC1965v034n04ABEH001446.

трещин и дефектов. Наличие глицерина в составе сформированной пленки также дополнительно усиливает ее защитный эффект.

Хлорид натрия перед использованием измельчали и использовали фракцию размером менее 0,5 мм. Технические лигносульфонаты использовали в виде натриевых солей в порошкообразном состоянии. Их растворяли в необходимом количестве дистиллированной воды и в приготовленный раствор добавляли расчетное количество глицерина квалификации «чистый». Затем готовили композицию из полученного раствора и твердого хлорида натрия. Приготовление исходных смесей заданного состава осуществляют в смесителях периодического действия с z-образными лопастями при 20±5°С. После этого композиции формовали послойным уплотнением в пресс-формах размером 400×300×45 мм с использованием вибрации и высушивали в печи при 105°С в течение 35 час. Из полученных заготовок вырезали образцы для испытаний размером 40×40×80 мм. Перед испытаниями образцы подвергали сушке до постоянного веса при 130°С. Испытания образцов полученного водоразрушаемого композитного материала проводили путем измерения прочности на сжатие на испытательной машине. Исследование свойств образцов проводили в зависимости от содержания в композиции: воды и лигносульфоната натрия. Определение характеристик проводили по трем параллельным образцам. Результаты испытаний представлены на Рисунке 6.

Как видно из рисунка 6, применение указанной композиции позволяет повысить прочность на сжатие материала формообразующих изделий до 15,0÷20,0 МПа. Испытания материала проводились при температуре 20℃. Повышение температуры проведения прочностных испытаний до 150℃ показало, что прочность материала снижается в среднем до 80% от значений прочности при 20℃. Из представленных данных видно, что основным фактором, определяющим прочность материала, является содержание воды в исходной композиции. Сам по себе лигносульфонат не несет функции связующего. Из рисунка 6 хорошо видно, что он является только модифицирующей добавкой. Однако их совместное присутствие с водой дает большой синергетический эффект, который выражается в наличии на представленном рисунке мощного максимума. Наличие такого максимума еще раз подтверждает существование эффекта А.Ф. Иоффе.



1 2

Рисунок 6. Прочность на сжатие водоразрушаемого композитного материала в зависимости от содержания в композиции: воды и лигносульфоната натрия. [σ] – Разрушающее напряжение при сжатии для образцов из композитного материала, МПа; *x* – отношение содержания воды к содержанию NaCl в композиции; *y* – отношение содержания лигносульфоната натрия к содержанию NaCl в композиции. 1 – Трехмерный вид; 2 – Изолинии

При изготовлении изделий из композиционных материалов методом намотки важным показателем является коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) материала. Это связано с тем, что при нагревании формообразующего материала или оправки в процессе изготовления изделий расширение материала может привести к значительным внутренним деформациям, вплоть до их разрушения. Поэтому важной задачей являлось получение материалов с низкими значениями коэффициентов линейного термического расширения.

Определение коэффициентов линейного термического расширения проводили на установке по дилатометрическим измерениям и изучению термомеханических свойств полимеров – УИП-70М. Установка обеспечивает автоматическое измерение и регистрацию деформаций, возникающих при одноосном сжатии исследуемого образца под действием различных фиксированных нагрузок. Испытания проводили в режиме дилатометрических измерений – удельное давление в диапазоне 0÷6 *МПа*. В ряде случаев это соответствует величинам контактных давлений, имеющихся при намотке изделий из полимерных композиционных материалов на разрушаемые оправки. Результаты термомеханических исследований для различных образцов представлены на Рисунке 7.

Приведенные результаты свидетельствуют о возможности регулирования КЛТР материала при сжимающей нагрузке путем введения в состав композиции глицерина в количестве 0,1÷1,2 масс.%. Таким образом, предлагаемая композиция обладает почти в 2 раза большей прочностью по сравнению с известными составами. Разработанная композиция также обладает меньшим коэффициентом линейного температурного расширения, что позволяет, в частности, использовать ее при изготовлении крупногабаритных изделий.

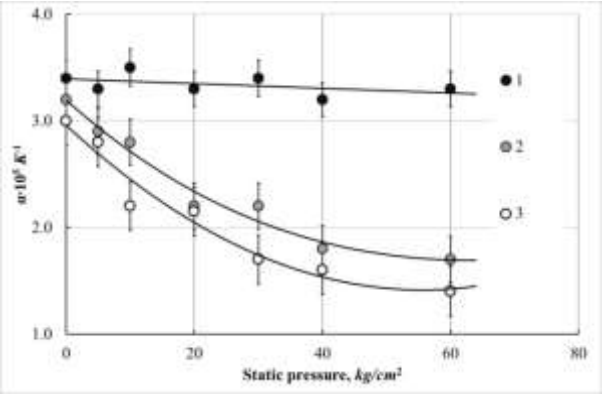


Рисунок 7. Результаты исследования термомеханических свойств полученных материалов. α – коэффициент линейного термического расширения. ЛСН – лигносульфонат натрия. Г – глицерин.
1 – образец состава NaCl – 86%, ЛСН – 6%; Г – 0,1%; H_2O – 7,9%.
2 – образец состава NaCl – 90%, ЛСН – 4%; Г – 0,5%; H_2O – 5,5%.
3 – образец состава NaCl – 93%, ЛСН – 1%; Г – 1,2%; H_2O – 5,0%

На основе проведенных исследований можно рекомендовать для создания водоразрушаемых конструкционных материалов композиции из хлорида натрия, лигносульфонатов, глицерина при следующем соотношении компонентов в масс. %:

– Хлорид натрия – 86,0÷93,0;
– Технические лигносульфонаты – 1,0÷6,0
– Глицерин – 0,1÷1,2
– Вода – Остальное.

4. Определение скорости растворения водоразрушаемых материалов

Важным свойством, определяющим возможность использования композиций для изготовления водоразрушаемых материалов, является скорость их растворения в воде при удалении оправки из внутренней полости готового изделия. Процесс растворения солей в воде можно представить в виде трех стадий:

– разрушение кристаллической решетки соли благодаря изменению электростатических сил при попадании соли в среду с большой диэлектрической проницаемостью;

– гидратация ионов соли;

– проникание молекул воды к поверхности растворяемого кристалла и переход гидратированных ионов вглубь раствора.

Последняя стадия наиболее продолжительна, поэтому процесс растворения сводится к диффузии растворяемого вещества из пограничной пленки в окружающую среду. Однако одной диффузии недостаточно для понимания явлений, происходящих при растворении соли. Для этого должны учитываться также гидродинамические условия, влияние силы тяжести и вязкости раствора.

В литературе имеются указания, что плавленая поваренная соль растворяется медленнее природной соли, а синтезированная поваренная соль растворяется быстрее природной каменной соли. Однако проведенные эксперименты показали, что природа соли не влияет на скорость ее растворения[38]. В процессе растворения соли наиболее медленной является стадия массопереноса, а скорость процесса в целом определяется скоростью именно этой стадии. Таким образом, кинетические закономерности такого процесса определяются закономерностями доставки вещества от поверхности твердой фазы из зоны растворения. Кинетика указанных процессов является диффузионной кинетикой. Она определяется, в основном, скоростью диффузии ионов соли из насыщенного раствора у поверхности растворяемого кристалла соли в объем раствора с меньшей концентрацией[39].

---

[38] Ксензенко В.И., Кононова Г.Н. Теоретические основы процессов переработки галургического сырья. Москва : Химия, 1982, 328 с.

[39] Фурман А.А., Шрайбман С.С. Приготовление и очистка рассола. Москва : «Химия», 1966, 232 с.; Ксензенко В.И., Кононова Г.Н. Теоретические основы процессов переработки галургического сырья. Москва : Химия, 1982, 328 с.

С точки зрения термодинамики движущим потенциалом любого выравнивающего процесса является рост энтропии. В большинстве практических случаев движущей силой является концентрация С, изменение которой обусловливает поддержание потоков вещества. Поток частиц вещества пропорционален при этом градиенту концентрации и описывается первым законом Фика:

$$J = -D\frac{\partial C}{\partial x}, \tag{8}$$

где плотность потока вещества J $[cm^{-2}s^{-1}]$ пропорциональна коэффициенту диффузии D $[cm^2s^{-1}]$ и градиенту концентрации. Второй закон Фика связывает пространственное и временное изменения концентрации (уравнение диффузии):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}D\frac{\partial C}{\partial x} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{9}$$

Коэффициент диффузии D зависит от температуры. В ряде случаев в широком интервале температур эта зависимость представляет собой уравнение Аррениуса:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \tag{10}$$

Если диффузия является стационарной, то распределение концентрации реагирующего вещества не зависит от времени, и в уравнение Фика следует положить $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$. Тогда очевидно, что

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0 \text{ и } \frac{\partial C}{\partial x} = const.$$

В начале и во время протекания процесса растворения концентрация растворяющегося вещества на поверхности твердой фазы C_s больше, чем объемная концентрация C_0. Если предположить, что изменение концентрации происходит в пределах некоторого слоя δ, называемого диффузионным, то тогда при линейном характере этого изменения имеем

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{C_0 - C_s}{\delta} \tag{11}$$

Из этого уравнения хорошо видно, что ускорить процесс можно уменьшая толщину диффузионного слоя или уменьшая концентрацию растворяемого продукта в основной массе растворителя. Для случая нестационарной линейной диффузии, когда $\frac{\partial c}{\partial t} \neq 0$, имеем рост эффективной толщины диффузионного слоя, которая увеличивается пропорционально квадратному корню из времени растворения[40]:

$$\delta = \sqrt{\pi D t} \tag{12}$$

Этот факт указывает на то, что скорость растворения будет уменьшаться не только за счет роста концентрации растворенного вещества в объеме растворителя, но и за счет роста толщины диффузионного слоя.

Установлена зависимость между константой скорости растворения и величиной относительной вязкости раствора, насыщенного растворяемой солью, что подтверждает предположение о существовании у поверхности кристалла растворяемой соли межфазного слоя раствора, почти насыщенного растворяемой солью[41]. Вязкость этого слоя определяет скорость диффузии растворяемой соли и таким образом влияет на скорость растворения.

Особо важным фактором является перемешивание раствора. При очень интенсивном перемешивании процесс растворения перестает быть диффузионным, то есть прекращается тормозящее влияние третьей стадии. В отсутствие перемешивания (как, например, в природных условиях подземного выщелачивания) скорость растворения солевого пласта в основном будет определяться коэффициентом диффузии ионов соли. Также положительное влияние на скорость растворения соляных монолитов оказывает циркуляция растворов. Благодаря циркуляции, растворяющие рассолы будут интенсивно и турбулентно перемешиваться, соответственно солевой монолит будет растворяться значительно быстрее.

Для упрощения анализа экспериментальных данных по изучению процессов водного разрушения разработанных материалов для изготовления оправок можно отойти от детального

---

[40] Коробов В.И., Очков В.Ф. Химическая кинетика. Введение с Mathcad/Maple/MC5. Москва : Горячая линия –Телеком, 2009, 384 с.

[41] Фурман А.А., Шрайбман С.С. Приготовление и очистка рассола. Москва, «Химия», 1966, 232 с.

рассмотрения механизма процесса растворения. Его можно рассматривать как простую гетерогенную химическую реакцию, протекающую на основании закона действующих масс. При этом для ее описания можно использовать классические уравнения химической кинетики. В такой формулировке уравнение, описывающее процесс растворения, будет иметь следующий вид:

$$W = \frac{1}{S}\frac{dC}{dt} = k(T) \cdot C^{n,} \qquad (13)$$

где W – скорость реакции растворения. В данной системе для удобства обработки экспериментальных данных скорость реакции растворения рассматривается в единицах скорости линейного перемещения растворяющейся поверхности;

$k(T)$ – константа скорости реакции растворения, зависящая от температуры процесса, геометрии частиц соли, гидродинамических условий его протекания и в некоторых случаях от концентрации соли в растворе;

n – порядок реакции, с учетом простоты реакции и наличия в процессе только одного растворяемого компонента, может быть принят равным $n = 1$;

S – площадь поверхности раздела фаз между твердой солью и контактирующим с ней раствором.

Как уже отмечалось, скорость растворения соли возрастает с ростом температуры. Результаты изучения влияния температуры на процесс растворения представлены на рисунке 8, в виде зависимости константы скорости от температуры. Рассчитанная для этих данных энергия активации процесса растворения составляет $E_{акт}$=17.2 *кДж/моль*.

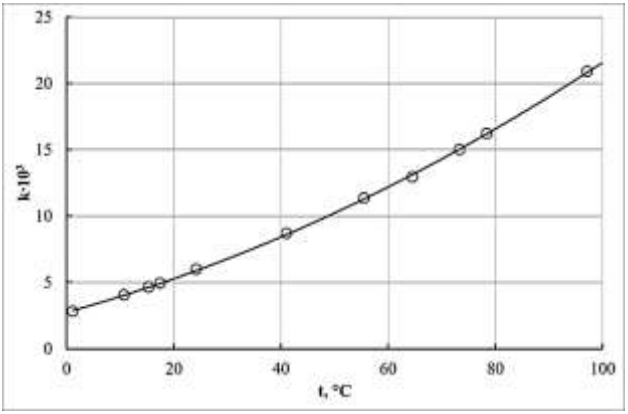


Рисунок 8. Зависимость константы скорости (*k*) растворения хлорида натрия от температуры[42]

Большой опыт по изучению скорости растворения монолитных образцов соли был накоплен в результате разработки методов подземного растворения солей[43]. Опираясь на этот опыт, мы изучили влияние различных факторов на скорость растворения монолитных образцов хлорида натрия в условиях свободной конвекции. При этом было обнаружено существенное влияние направления силы тяжести по отношению к поверхности монолитных образцов при их растворении.

Зависимость скорости ***W*** и константы скорости ***k*** растворения соли от ее концентрации в растворе при прохождении массообменных процессов в условиях свободной конвекции приведена на рис. 9 и 10. На рисунке 9 также представлены данные по скорости растворения монолитных образцов соли, поверхность которых расположена под разными углами θ по отношению к линии горизонта.

[42] Фурман А.А., Шрайбман С.С. Приготовление и очистка рассола. Москва, «Химия», 1966, 232 с.

[43] См.[42]

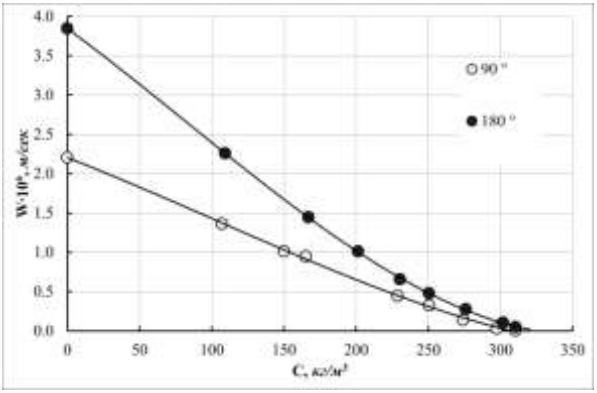


Рисунок 9. Зависимость скорости растворения соли от концентрации ее в растворе при 25 °С. Углы наклона растворяемого образца равных 90 и 180°. Растворение проводилось в условиях свободной конвекции. Углы наклона θ поверхности растворяемого образца составляли 90 и 180°. Расчеты проведены на основе данных, представленных в работе[44]

Нелинейный характер функции ***W***(C) обусловлен существенным изменением константы ***k***(C) скорости растворения NaCl в зависимости от концентрации соли в растворителе. Как следует из рисунка 10, этот эффект особенно заметен в области высоких концентраций соли. Эффект геометрии расположения образцов по отношению к направлению силы тяжести весьма заметен, особенно при большой концентрации раствора. Можно предположить, что этот эффект обусловлен движением более концентрированных растворов под действием силы тяжести в нижнюю часть сосуда, в котором происходит растворение образцов. Этот эффект практически приводит к дополнительной конвекции и уменьшению толщины диффузионного слоя.

[44] Schmid B., Boas W., Crystal Plasticity, Springer, Berlin, 1936.

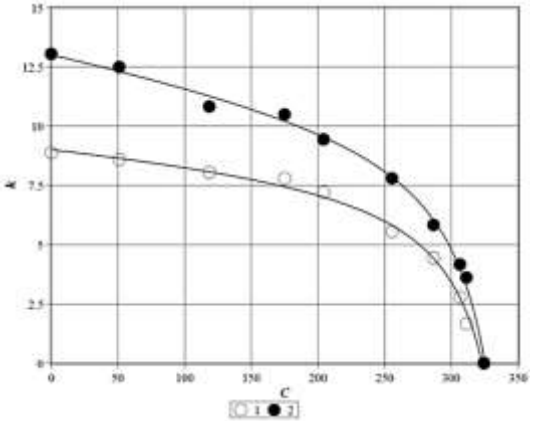


Рисунок 10. Зависимость константы скорости растворения NaCl ($k \cdot 10^3$) от ее концентрации (C, *кг/м*^{3}) в водном растворе при различной температуре (1–10°C; 2–25°C). Растворение проводилось в условиях свободной конвекции для вертикальной поверхности образца соли (θ=90°). Расчеты были проведены на основе данных, представленных в работе[45]

Как было показано в работе[46], при растворении соли в геологических пластах большое значение имеет угол наклона растворяющейся поверхности. На рисунке 11 показано, что с уменьшением угла наклона растворяющейся поверхности скорость выщелачивания резко снижается. Особенно этот эффект заметен при угле менее 90°. При подземном выщелачивании солей эксплуатация скважины прекращается, если угол наклона стенки депрессионной воронки становится менее 30÷40°. Кроме того, прекращение эксплуатации связано с отложением на растворяющихся поверхностях нерастворимых включений, предельный угол естественного откоса которых составляет также 30÷35°. Поэтому растворение соли целесообразно вести таким образом, чтобы реакционная поверхность находилась под таким углом, который значительно превышает предельный угол растворения.

---

[45] Schmid B., Boas W., Crystal Plasticity, Springer, Berlin, 1936.

[46] Ксензенко В.И., Кононова Г.Н. Теоретические основы процессов переработки галургического сырья. Москва : Химия, 1982, 328 с.

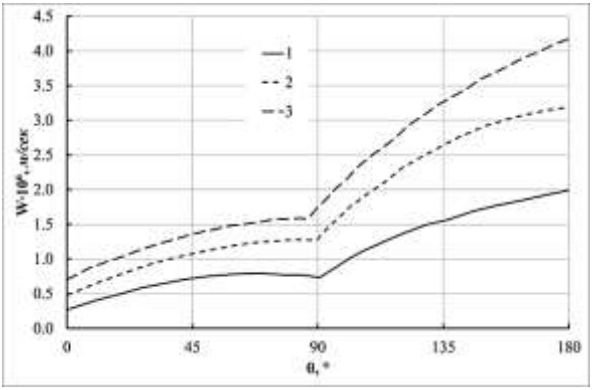


Рис. 11. Зависимость скорости растворения каменной соли в воде от угла наклона растворяющейся поверхности. Температура: 1–0,5°С; 2–15°С; 3–25°С[47]

В случае размывания солевых оправок больших размеров, особенно в корпусах крупногабаритных ракетных двигателей, этот процесс желательно вести при вращении корпуса двигателя вокруг центральной оси. Это будет приводить к усреднению угла растворяющейся поверхности, к турбулизации течения раствора и к дополнительному его перемешиванию. Все это в совокупности будет приводить к ускорению процесса разрушения оправок.

Кроме температуры, угла наклона поверхности растворения и концентрации соли в растворе, заметное влияние на кинетику растворения соли оказывает перемешивании раствора, а именно скорость движения растворителя относительно поверхности соли. Эффект ускорения процесса растворения соли при движении растворителя обусловлен уменьшением толщины диффузионного пограничного слоя, что приводит к увеличению константы скорости растворения. Он также обусловлен отрывом пограничного слоя при движении жидкости против течения слоя или при ее турбулентном движении. Наличие пор в структуре образцов соли также способствует ускорению ее растворения, особенно за счет протекания раствора через слой соли.

[47] Ксензенко В.И., Кононова Г.Н. Теоретические основы процессов переработки галургического сырья. Москва : Химия, 1982, 328 с.

Кроме того, совершенно не обязательно добиваться полного растворения материала оправки при его вымывании. Вполне достаточно достичь частичного растворения, при котором нарушится монолитность материала оправки и произойдет ее разрушение с образованием суспензии соли в ее растворе. Эта суспензия может быть легко удалена из корпуса изделия и использована повторно, после соответствующего кондиционирования.

5. Расчет плотных упаковок компонентов дисперсной фазы

Как уже отмечалось в нашей предыдущей работе[48], прочность водоразрушаемых композиционных материалов во многом определяется дисперсным составом наполнителя, используемого при их получении. В случае большой концентрации частицы дисперсного наполнителя расположены близко между собой. Создаваемые микрочастицами силовые поля пересекаются и оказывают взаимное влияние друг на друга, что существенно отражается на свойствах композита уже на макроуровне. При этом зависимость силы взаимодействия между соседними включениями от величины зазора между ними имеет значительную нелинейность. В связи с этим можно констатировать, что именно структура и топология заполнения объема материала дисперсными частицами наполнителя является одним из основных факторов в формировании деформационных и прочностных свойств высоконаполненного зернистого композита.

Как известно, прочность материалов на основе структурированных дисперсных систем зависит от пористости и диаметра исходных дисперсных частиц. Эта связь описывается эмпирическим уравнением, аппроксимирующим зависимость прочности образцов хрупких поликристаллов от комбинированного эффекта пористости и размера зерен. Она была разработана на основе экспериментальных данных, имеющихся в литературе. Полученная закономерность была проверена на данных, полученных для

[48] Kudryavtsev P. Composite materials for manufacture of water destroyable form-forming equipment. *Journal "Scientific Israel- Technological Advantages",* Vol.20, № 1, 2018, pp.40-45, ISSN: 1565-1538.

образцов оксида тория и карбида хрома. Эта зависимость может быть описана формулой Кнудсена[49]:

$$P = K \cdot d^{-a} \cdot \exp(-b \cdot \alpha) \quad (14)$$

где P – прочность материала; K – пересчетный коэффициент; d – диаметр частиц дисперсной фазы; a, b – константы; α – пористость сформированной структуры. Уравнения предлагаемой формы были сопоставлены на основе экспериментальных данных и позволяют в определенной степени предсказать значения прочности с точностью до ±10%. Вариации происходят как следствие температуры, при которой образцы были изготовлены. Этот фактор оказывает дополнительное влияние на прочность без учета того, что обусловлено результирующими изменениями пористости и размера зерна. Это явление находит свое отражение в уменьшении величины константы ***b***, происходящем с увеличением максимальной температуры изготовления образцов. Вне зависимости от имеющихся ограничений это уравнение имеет фундаментальное значение. Из этого соотношения следует однозначный вывод о том, что для получения материала с максимальным уровнем физико-механических характеристик необходимо добиться его минимальной пористости и, соответственно, максимальной плотности упаковки частиц дисперсной фазы.

В работе[50] приведен обзор основных методов исследования геометрии структур из случайно расположенных частиц круглой формы. Предложен алгоритм компьютерного синтеза пространственных систем из моно- и полифракционных плотных случайных упаковок жестких сфер с заранее заданной степенью наполнения. Проведено исследование структурных характеристик численно синтезированных случайных геометрических систем. Для двухфракционных наполнений установлены оптимальные гранулометрические составы.

---

[49] Knudsen F.P. Dependence of Mechanical Strength of Brittle Polycrystalline Specimens on Porosity and Grain Size. *Amer. J. Ceramic. Soc.* 1959, V.42, No 8, P. 376–387. URL: https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1959.tb13596.x

[50] Garishin O.C., Moshev V.V., Modelling of mechanical behaviour of damageable particulate composites, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 31, Issue 1, 1999, Pages 61-66, ISSN 0167-8442. URL: https://doi.org/10.1016/S0167-8442(98)00067-6.

Для регулярных плотных монодисперсных упаковок степень наполнения есть величина, строго определенная для каждого типа структуры, и может быть легко вычислена теоретически. Так, для кубической решетки ее значение равно 52.36%, а для плотнейшей гексагональной упаковки составляет 74.05%. Экспериментально установлено[51], что для случайной монодисперсной структуры из сферических элементов предельная степень наполнения составляет около 63.7%. Это значение лежит примерно посредине между наполнениями, характерными для кубической и гексагональных упаковок, причем локальные флуктуации по объему структуры могут достигать до 10% от среднего значения[52]. Отсюда следует, что в реальных структурах довольно сложно добиться высокой плотности заполнения и такие задачи решаются только методами создания полидисперсных структур, в которых малые частицы занимают пустые пространства между крупными упакованными частицами. При этом еще более мелкие частицы занимают оставшиеся более малые полости.

Плотность упаковки дисперсного материала с непрерывным распределением частиц по размерам можно рассчитать по методике, описанной в работе[53]. В соответствии с этой методикой принято считать, что к плотным относятся дисперсные продукты, получаемые из совокупности фракций наполнителей, диаметр зерен в которых уменьшается в 2 раза от фракции к фракции, а количество соответствующих фракций по весу составляет 0,7÷0,9 долей от массы предыдущей фракции. Это число называется коэффициентом совпадения и показывает в каком соотношении находится данная фракция по отношению к предыдущей фракции с большим размером частиц.

Гранулометрический состав, необходимый для создания плотной упаковки дисперсного материала, определяется по уравнению (15)

---

[51] Scott G.D. Radial distribution of the random close packing of equal spheres. Nature. 1962. V. 194, № 9. P. 956–958; Scott G.D., Kilgour D.M. The density of random close packing of spheres. Brit. J. Appl. Phys. Ser. 2. 1969. V. 2. P. 863–866.

[52] Займан Дж. Модели беспорядка. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем. Москва : Мир, 1982. 592 с.

[53] Рыбьев И.А. Асфальтовые бетоны. Москва, 1969. С.300.

$$a_1 + a_1K + a_1K^2 + a_1K^3 + \cdots + a_1K^{n-1} = 100\%, \quad (15)$$

где a_1 – весовое количество первой фракции; K – коэффициент сбега; n – количество фракций. Таким образом, весовое количество 1-й фракции может быть рассчитано по формуле (16), а весовое количество каждой из последующих фракций, соответственно по формуле (17):

$$a_1 = \frac{100 \cdot (K-1)}{K^n - 1} \quad (16)$$

$$a_n = a_{n-1} \cdot K \quad (17)$$

В качестве примера таких расчетов в таблице 1 представлены результаты расчета плотной упаковки дисперсных фаз с различными коэффициентами совпадения. Для наглядности получаемых результатов был выбран случай, когда дисперсный материал состоит из трех различных фракций.

Таблица 1

Результаты расчета плотной упаковки состава полидисперсного материала

Фракции, *мм*	**Содержание фракции, вес. %**		
	К = 0,7	**К = 0,8**	**К = 0,9**
0,315 ÷ 0,2	45,66	40,98	22.37
0,2 ÷ 0,1	31,96	32,78	26,23
меньше 0,1	22,37	26,23	29,89

В качестве оптимального гранулометрического состава были выбраны фракции с коэффициентом совпадения 0,7, так как в этом случае потребуется меньшее количество фракции со средним диаметром частиц $d_{ср}<10^{-4}$ *м*. Выход такой фракции при размоле и фракционировании обычно очень мал и его изготовление требует дополнительного времени и энергозатрат на размол исходного материала.

В случайных упаковках нескольких фракций дисперсных материалов наполнение является функцией от различий в размерах частиц, их формы и соотношения объемных долей фракций.

В работах[54] предложен феноменологический метод расчета пористости для двух и более фракционных насыпных смесей, основанный на данных, полученных из обширных экспериментальных исследований. По их методике относительная ошибка в оценке пористости для смесей, состоящих из двух фракций, лежала в диапазоне от -10 до +20%, а для систем из трех и четырех фракций разброс составлял от -15 до +25% по сравнению с опытными данными, то есть происходило некоторое систематическое завышение расчетных значений. В работе[55] этот подход обобщен на случай стохастических структур с непрерывным распределением частиц по размерам.

Предложенный метод был нами доработан для исследуемой системы. С учетом внесенных корректировок и в связи с универсальностью применения предложенной методики расчета для других дискретных продуктов, считаем целесообразным привести его в более полном виде.

Введем некоторые обозначения:

α_i – доля- i-й фракции в продукте; W_i – масса i-й фракции, *г*; M_i – масса навески продукта при рассеве, *г*; $d^i_{\text{ср}}$ – средний диаметр i-й фракции, *мм*; d^i_1, d^i_2 – меньший и больший диаметры фракции, *мм*; $D_{\text{пр}}$ – приведенный диаметр продуктов (пр.м., пр.к. – мелкого и крупного соответственно), *мм*; l – коэффициент пористости, доли ед.; $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность продукта, *г/см*^{3}; $\rho_{\text{уд}}$ – удельная плотность продукта, *г/см*^{3}; Ψ, K – безразмерные коэффициенты; X_k, X_m – объемные доли продуктов.

Последовательность расчетов заключается в следующих шагах. Определяем:

– долю каждой фракции в смеси твердых дисперсных фаз

$$\alpha_i = \frac{W_i}{M_i}; \tag{18}$$

– средний диаметр фракций компонентов смеси

---

[54] Więckowski A., Strek F. Porowatosc mieszanin cial sypkich. Mieszaniny dwuskładnikowe. *Chemia stosowana.* 1966. № IB. P. 95–127; Więckowski A., Strek P. Porowate rial sypkich. Mieszaniny wieloskładnikowe. *Chemia stosowana.* 1966. № 4b. p. 431-447

[55] Иванов В.А., Мошев В.В. Плотность упаковки сыпучих сред. *Структурная механика неоднородных сред.* Свердловск, 1982. С. 19–27.

$$d_{\text{ср}}^{i} = \frac{d_1^i + d_2^i}{2}; \quad (19)$$

– приведенный, средневзвешенный диаметр компонентов смеси

$$D_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^{n} d_{\text{ср}}^{i} \cdot \alpha_{i;} \quad (20)$$

– коэффициенты пористости исходных продуктов

$$l = \left(1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{н}}}\right); \quad (21)$$

– отношение приведенных диаметров компонентов смеси

$$\Psi = \frac{D_{\text{пр.м}}}{D_{\text{пр.к}}}. \quad (22)$$

Введем коэффициент K_3, являющийся функцией коэффициента отношения приведенных диаметров компонентов смеси:

$$K_3 = \frac{(1 - \Psi)^2}{\Psi \cdot (1 + 5 \cdot \Psi) + (1 - \Psi)^2} \quad (23)$$

На основании литературных данных[56] оптимальный состав смеси, состоящей из двух компонентов и коэффициент ее пористости, можно рассчитать по уравнениям (24), (25) и (26):

$$l = X_k \cdot l_k + X_m[K_2(1 + l_m) - 1]; \quad (24)$$

$$l = X_k \cdot l_k \cdot K_1 + X_m \cdot l_m; \quad (25)$$

$$l = X_k \cdot l_k + X_m \cdot l_m - K_3 \frac{l_m(1 + l_m)}{1 + l_k + l_m} \quad (26)$$

[56] Więckowski A., Strek F. Porowatosc mieszanin cial sypkich. Mieszaniny dwuskładnikowe. *Chemia stosowana.* 1966.№ IB. P. 95–127; 52. Więckowski A., Strek P. Porowate rial sypkich. Mieszaniny wieloskładnikowe. *Chemia stosowana.* 1966. №4b. p. 431–447.

Для сложной смеси, состоящей как минимум из смеси двух фракций, возможны два варианта решения в зависимости от соотношения коэффициентов продуктов. При условии, если коэффициент пористости крупного продукта больше, чем мелкого, то оптимальный состав находится из равенств (25) и (26).

Исходя из приведенных выше выражений, рассчитываем коэффициент K_1:

$$K_1 = \frac{\Psi \cdot (1 + 2 \cdot \Psi)}{\Psi(1 + 2 \cdot \Psi) + (1 - \Psi)^2} \tag{27}$$

Вычисляем объемные доли продуктов в смеси оптимального состава:

$$X_k^* = \frac{K_3(l_m + 1)}{(1 - K_1)(1 + l_m + l_k)} \tag{28}$$

$$X_m = 1 - X_k^* \tag{29}$$

Подставив оптимальные значения объемных долей в уравнения (25) или (26), вычисляем минимальный коэффициент пористости:

$$l^* = l_m - \frac{K_3(l_m + 1)(l_m - K_1 \cdot l_k)}{(1 - K_1)(1 + l_m + l_k)} \tag{30}$$

Если коэффициент пористости крупного продукта меньше, чем мелкого, то оптимальный состав находим из уравнений (24) и (26).

Отсюда рассчитываем коэффициент K_2:

$$K_2 = \frac{\Psi^2(3 + \Psi)}{\Psi^2(3 + \Psi) + (1 - \Psi)^3} \tag{31}$$

Опираясь на рассчитанные коэффициенты, вычислим объемные доли фракций в смеси оптимального состава:

$$X_m^* = \frac{K_3 \cdot l_k}{(1 - K_2)(1 + l_m + l_k)} \tag{32}$$

$$X_k^* = 1 - X_m \tag{33}$$

Подставив полученные оптимальные значения объемных долей в уравнения (24) или (26), вычислим минимальный коэффициент пористости:

$$l^* = l_k - K_3 \frac{l_k(l_m - 1)}{(1 + l_m + l_k)} \left[1 + \frac{l_m + l_k}{(l_k + 1)(1 - K_2)}\right] \quad (34)$$

Отсюда определим плотность упаковки полученной смеси:

$$\varphi = \frac{100}{l^* + 1} \quad (35)$$

При работе с сыпучими продуктами удобнее пользоваться не объемными, а массовыми долями компонентов. Для этого необходимо учитывать плотность используемых продуктов. Массовую долю компонентов вычисляем по формуле (36):

$$X_{\text{вес}} = X^* \cdot \rho \quad (36)$$

Вычисляем сумму массовых долей компонентов и содержание компонентов в смеси при выражении каждой доли в процентах:

$$X = X_{\text{вес}} \cdot \frac{100}{\sum X_{\text{вес}}} \quad (37)$$

Разработанная методика была реализована в виде программы расчета плотной упаковки. Исходные данные для расчета плотной упаковки дисперсных продуктов приведены в таблице 2.

Результаты расчета необходимого соотношения двух полидисперсных продуктов приведены в таблице 3.

Таблица 2

Исходные данные для расчета плотной упаковки дисперсных продуктов

№ композиции	№ продукта	Состав твердой среды	$d_{ср}$, *мм*	$\rho_{уд}$, *кг/м*^{3}	$\rho_{нас}$, *кг/м*^{3}	Пористость, %
I	1	Хлорид натрия крупнозернистый	0,81	2165	1237	57,1
	2	Хлорид калия мелкозернистый	0,15	1980	1218	61,5
II	3	Песок кварцевый	0,20	2600	1602	61,6
	4	Кварц пылевидный	0,045	2600	1418	54,5

Таблица 3

Результаты расчета упаковки двух полидисперсных продуктов

№ композиции	Продукт	Весовая доля (X), мас.%	Максимальная плотность упаковки (Ψ) %
I	NaCl	84.5	83,9
	KCl	15,5	
II	песок	84,4	83,2
	Кварцевая пыль	15,6	

Составы смесей твердых фаз дисперсных продуктов, указанные в таблице 3, использовались в композициях для получения водоразрушаемых материалов.

6. Результаты испытаний полученных композиционных материалов

При изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки на оправку отверждение получаемых материалов осуществляется при повышенной температуре. В связи с этим важным показателем является термическая стойкость материалов, используемых для изготовления оправок. В созданных нами композициях лимитирующим термостойкость компонентом являются технические лигносульфонаты, которые используются в качестве добавок со связующими и суперпластифицирующими свойствами. С целью установления предела их термической стойкости были проведены термогравиметрические исследования использованных в экспериментах технических лигносульфонатов. Эти исследования проводились на дериватографе Q-1500 D. Полученные результаты представлены на рисунке 12.

Проведенные исследования показали, что в интервале температур от 80 до 160°С происходит удаление структурированной физически связанной влаги. Энергия активации этого процесса, вычисленная методом наименьших квадратов из термографических данных, составляет 38,5±1,1 кДж/моль. Максимум скорости потери веса образца в этом процессе составляет 115±5°С.

Повышение температуры до 200°С практически не вызывает процесса деструкции использованных технических лигносульфонатов. Начало процесса их деструкции наблюдается по достижении температур 215÷220°С. Энергия активации этого процесса, вычисленная методом наименьших квадратов из

термографических данных, составляет 64,0±1,5 кДж/моль. Максимум скорости потери веса образца в результате его термической деструкции составляет 285±5°С.

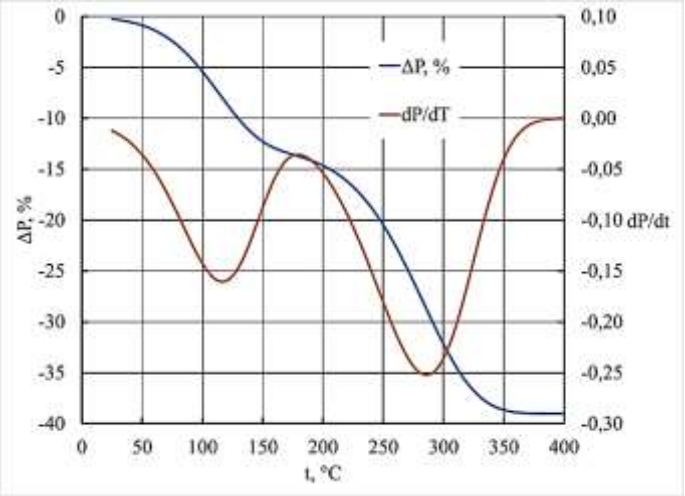


Рисунок 12. Результаты термогравиметрических исследований технических лигносульфонатов

Приведенные выше результаты позволяют рассматривать технические лигносульфонаты в качестве перспективных добавок со связующими и суперпластифицирующими свойствами для материалов водоразрушаемых формообразующих элементов повышенной теплостойкости, способных работать в условиях термического отверждения полимерных композиционных материалов.

В качестве связующего и суперпластификаторов применялись водные растворы лигносульфонатов с упрочняющими добавками[57]. Результаты измерения физико-механических характеристик и плотности полученных образцов разрабатываемых материалов представлены в таблице 4.

[57] Kudryavtsev P. Composite materials for manufacture of water destroyable form-forming equipment. *Journal "Scientific Israel- Technological Advantages"* Vol. 20, № 1, 2018, pp. 40-45, ISSN: 1565-1538.

Таблица 4

Физико-механические характеристики образцов полученных материалов

№ композиции	Разрушающее напряжение при сжатии, МПа		$\rho_к$, *кг/м*^{3}
	$\sigma_{сж}$, 20 °С	$\sigma_{сж}$, 150 °С	
I	14.0	9.0	1700
II	43.0	27.0	2000

Примечание: состав композиции в соответствии с табл. 3

Более высокие значения $\sigma_{сж}$ у композиции на основе кварцевого песка объясняются тем, что используемые дисперсные продукты имели меньшую крупность. Поэтому увеличивалось количество контактов на единицу сечения, что в конечном счете приводило к увеличению прочности материала.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе проведен анализ требований, предъявляемых к физико-химическим и механическим свойствам материалов, используемых для изготовления водоразрушаемых формообразующих изделий. Изучены свойства водоразрушаемых композиционных материалов на основе жидкого стекла. На основе анализа физико-химических и механических свойств различных химических соединений произведен выбор основы для изготовления формообразующих изделий на основе водоразрушаемых материалов. При разработке водоразрушаемых конструкционных материалов нами был использован эффект, открытый А.Ф. Иоффе.

Разработаны водоразрушаемые композиционные материалы на основе галогенидов щелочных металлов для изготовления формообразующих изделий и оправок для намотки изделий типа «кокон». Композиция также содержит технические лигносульфонаты и глицерин при следующем соотношении ингредиентов, масс. %: хлорид натрия 86÷93; технические лигносульфонаты 1÷6; глицерин 0,1÷1,2; вода остальное.

Важным свойством, определяющим возможность использования композиций для изготовления водоразрушаемых материалов, является скорость их растворения в воде при удалении оправки из внутренней полости готового изделия. Проведены исследования по определению скорости растворения водоразрушаемых материалов в воде и предложены пути ускорения этого процесса. Исследовано

влияние различных факторов на процесс растворения и обнаружено влияние геометрии поверхности разрушаемого материала на скорость его разрушения под действием воды.

Использование в качестве суперпластификатора лигносульфоната натрия и введение в состав смеси глицерина при указанном соотношении компонентов позволяет повысить прочность материала при одновременном снижении коэффициента температурного расширения (КЛТР).

Использование указанной композиции позволяет повысить прочность формообразующих изделий, что ведет к снижению брака отливок, вызванного преждевременным разрушением литейных стержней, и повысить удельное давление литья и тем самым расширить номенклатуру изготавливаемых изделий и ассортимент перерабатываемых, материалов. Использование композиции для изготовления водорастворимых оправок, применяемых при намотке изделий из полимерных композиционных материалов, позволит повысить прочностные характеристики материала изделий. Это достигается за счет повышения натяжения армирующих нитей и соответственно уровня контактных давлений при намотке изделий, что дает возможность уменьшить их вес при заданном уровне прочностных показателей, снизить расход дорогостоящих материалов.

На основе изложенных в настоящей работе общих принципов сформированы подходы к созданию водоразрушаемых композиций и получению на их основе водоразрушаемых материалов с высокими физико-механическими характеристиками.

Решение этой задачи связано с разработкой научных основ получения материалов для изготовления водоразрушаемых формообразующих элементов с заданными свойствами и поиском методов целенаправленного регулирования их свойств. Предложен перспективный метод получения материалов для изготовления водоразрушаемых формообразующих элементов путем структурообразования исходной дисперсной системы в результате выделения новой фазы из растворов. Показано, что в исследованных системах можно добиться значительного изменения их свойств за счет варьирования фракционного состава наполнителя, размеров и формы включений. Структура таких материалов определяющим образом оказывает влияние на их прочностные свойства. При проведении экспериментов по получению водоразрушаемых материалов в работе использовались

компоненты дисперсной фазы на основе хлоридов натрия, калия и диоксида кремния различного гранулометрического состава. Во всех случаях использовались водорастворимые органоминеральные добавки в виде технических лигносульфонатов. Добавки лигносульфонатов выполняют в разработанных композициях несколько функций. Они одновременно являются суперпластификаторами и связующими. Полученные результаты показали, что технические лигносульфонаты можно использовать в качестве перспективных добавок, которые обладают связующими и суперпластифицирующими свойствами для материалов водоразрушаемых формообразующих элементов повышенной теплостойкости, способных работать в условиях термического отверждения полимерных композиционных материалов.

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа относится к области машиностроения, а именно к изготовлению водоразрушаемых формообразующих изделий, например, литейных стержней, применяемых при литье металлов и пластмасс, а также изделий типа «кокон» и корпусов ракетных двигателей на твердом топливе. Кроме того, они могут быть использованы для изготовления водорастворимых оправок, применяемых при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки или выкладки с использованием связующих, требующих повышенных температур отверждения и в условиях механических напряжений. Проведен анализ возможного использования различных водоразрушаемых материалов для создания подобных изделий. Проанализированы свойства водоразрушаемых композиционных материалов на основе жидкого стекла и возможности их использования для изготовления оправок. На основе проведенного анализа сделан выбор основы для изготовления основы для изготовления оправок на основе водоразрушаемых материалов. Проведен анализ физико-механических свойств галогенидов щелочных металлов и произведен обоснованный выбор веществ основы, подходящих для изготовления водоразрушаемых композиционных материалов. Предложена рецептура и технология изготовления изделий из водоразрушаемых материалов. Проведен анализ процессов при разрушении этих материалов после их использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавров Л.Н., Думин О.С., Соколовский М.И. и др. Конструкции ракетных двигателей на твердом топливе / Под общ. ред. чл. корр. РАН, д.т.н., проф. Л.Н. Лаврова. Москва : Машиностроение, 1993. 215 с.

2. Соколовский М.И. Развитие конструктивно-компоновочных схем крупногабаритных ракетных двигателей твердого топлива. *Известия Российской Академии наук. Энергетика*. № 2, 2003, с. 97.

3. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. Москва : Машиностроение, 1987.

4. Суходоева А.А. Численный анализ напряженно-деформированного состояния и оценка прочности оправок для намотки композиционных оболочек. Пермь : ПГТУ, 2000.

5. Бойко В.В. Синтез поливинилового спирта в водно-спиртовых средах : дис. канд. хим. наук. 02.00.06 : Москва, 2004, 112 с.

6. Kudryavtsev P. Composite materials for manufacture of water destroyable form-forming equipment. Journal “Scientific Israel – Technological Advantages”, Vol. 20, № 1, 2018, pp. 40–45. ISSN: 1565-1538.

7. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика : избр. тр. Москва : Химия, 1979.

8. Абрамсон А.А. и Щукин Е.Д. (ред.). Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества. Москва : Химия, 1984.

9. Жуковский С.С., Лясс А.М. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей. Москва : Машиностроение, 1978. 24 с.;

10. Корнеев В.И., Юргинсон Е.Н., Кузьмин Б.А. Опыт разработки и применения связующих для легковыбиваемых формовочных смесей. Ленинград : ЛДНТП, 1986. 26 с.

11. Kudryavtsev P., Figovsky O. Advanced Nanomaterials Based on Soluble Silicates. *Journal Scientific Israel – Technological Advantages.* Vol. 16, № 3, 2014, p. 38–76.

12. Lebo, S. E., Gargulak, J. D. and McNally, T. J. Lignin. Kirk-Othmer *Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley & Son, (2001).

13. Терещенко А.Г. Гигроскопичность и слеживаемость растворимых веществ. Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 79 с.

14. Хамский Е.В. Кристаллические вещества и продукты. *Методы оценки и совершенствования свойств.* Москва : Химия. 1986, 224 с.

15. Волков В.А. Разработка технологии основ неслеживемости хлорида калия : автореферат канд. дисс. Ленинград, 1986.
16. Пойлов В.З. Основы технологий некоторых кристаллических продуктов с заданными свойствами : автореферат докт. дисс. Пермь, 1998.
17. Черепанова М.В., Потапов И.С., Пойлов В.З., Попова К.В., Алиферова С.Н. Влияние условий хранения и транспортировки на физико-механические свойства гранулированного хлорида калия. *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология.* 2012. № 13.
18. Zurimendi J., Bolivar C.; Rafael A. Anti- caking composition. United States Patent № 4,772,308, Current International Class: B01J 2/30; C05C 1/02; C05C 1/00; C05G 003/00; C05C 001/02; C05C 003/00. 20.09.1988.
19. Юркина М.И. Исследование процесса устранения слеживаемости хлористого калия с помощью добавок ферроцианида и аминов : автореферат канд. дисс. Пермь, 1974.
20. Hill, J.C. Johann Glauber's discovery of sodium sulfate – Sal Mirabile Glauberi. *Journal of Chemical Education*. 1979, Vol. 56, No 9, p. 593.
21. Гилман Дж. Механические свойства ионных кристаллов. *Успехи физических наук.* 1963 т. 80. Вып. 7. с. 455–503.
22. Slaughter W.S. The Linearized Theory of Elasticity, Springer, 2002, 512 p. ISBN: 978-1-4612-6608-2
23. Коробов В.И., Очков В.Ф. Химическая кинетика. Введение с Mathcad/Maple/MC5, М., Горячая линия – Телеком, 2009, 384 с.
24. Hearmon R.F.S. The Elastic Constants of Anisotropic Materials, Rev. Mod. Phys., 1946, Vol. 18, Issue 3, p. 409.
25. Morris D.F.C., The lattice energies of the alkali halides, Acta Cryst. Vol.9, 2, p.197 (1956). doi: 10.1107/S0365110X56000498
26. Harrison W.A. Solid State Theory. Dover Publications, Inc. New York, 1980. 541 p.
27. Brazhkin V.V., Grimsditch M., Guedes I., Bendeliani N.A., Dyuzheva T.I., Lityagina L.M. Elastic moduli and the mechanical properties of stishovite single crystals, Phys. Usp. Vol. 45, p. 447–448, 2002; DOI: 10.1070/PU2002v045n04ABEH001162.
28. Hearmon R.F.S. The elastic constants of anisotropic materials—II, Advances in Physics, 1956, Vol. 5, Issue 19, p. 323–382.
29. Huntington H.B. The Elastic Constants of Crystals, Solid State Physics, 1958, Vol. 7, p. 213–351.
30. Фурман А.А., Шрайбман С.С. Приготовление и очистка рассола, Москва, «Химия», 1966, 232 с.

31. Иоффе А.Ф. Избранные труды. Том I. Механические и электрические свойства кристаллов. Изд-во «Наука», Ленингр. отд. Ленинград, 1974. стр. 1–327.
32. Joffe A., Lewitzky M. Über die Kohäsionsfestigkeit von Steinsalz, Zeitschrift fur Physik. 1929, Bd. 35. S. 442–445.
33. Фурман А.А., Бельды М.П., Соколов И.Д. Поваренная соль. Производство и применение в химической промышленности. Москва : Химия, 1989, 272 с.
34. Schmid B., Boas W., Crystal Plasticity, Springer, Berlin, 1936.
35. Бугаенко Л.Т., Рябых С.М., Бугаенко А.Л. Почти полная система средних ионных кристаллографических радиусов и ее использование для определения потенциалов ионизации. *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия.* 2008. Т. 49, № 6, с. 363–385.
36. Кудрявцев П.Г. Журавлев С.Г., Ботов В.А., Клячкин Ю.С., Лавров Л.Н., Ипанова О.П., Новгородцева М.М., Шафит Я.М., Леонов А.А., Радушев А.В., Бегишев В.П. Композиция для изготовления водорастворимых формообразующих изделий, А.С. СССР № 1696097 по заявке № 4634416/33 от 9.01.89, опубл. Б.И. №45 от 07.12.91.
37. Gargulak, J. D., Lebo, S. E. and McNally, T. J. (2015). Lignin. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc (Ed.). doi:10.1002/0471238961.12090714120914.a01.pub3.
38. Pang B., Yang S., Fang W., Yuan T.-Q., Argyropoulos D.S., Sun R.-C., Structure-property relationships for technical lignins for the production of lignin-phenol-formaldehyde resins, Industrial Crops and Products, Vol. 108, 2017, P. 316-326, ISSN 0926-6690. URL: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.009.
39. Sjöström E., Chapter 4 - LIGNIN, In Wood Chemistry (Second Edition), Academic Press, San Diego, 1993, P. 71-89, ISBN 9780080925899. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092589-9.50008-5.
40. Gellerstedt G., Henriksson G., Chapter 9. Lignins: Major Sources, Structure and Properties, In Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources, edited by Mohamed Naceur Belgacem and Alessandro Gandini, Elsevier, Amsterdam, 2008, P. 201-224, ISBN 9780080453163. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00009-0.
41. Расширение использования технических лигносульфонатов в народном хозяйстве: Материалы всесоюзного научно-технического семинара. Москва, 1967. С. 62.
42. Чудаков М.А. Промышленное использование лигнина. Москва : Лесная промышленность, 1972. С. 62.

43. Sergeeva V.F., Salting-out and salting-in of non-electrolytes, Russ. Chem. Rev., 1965, vol. 34, 4, p. 309–318. URL: https://doi.org/10.1070/RC1965v034n04ABEH001446.

44. Ксензенко В. И., Кононова Г. Н. Теоретические основы процессов переработки галургического сырья. Москва : Химия, 1982. 328 с.

45. Knudsen F.P. Dependence of Mechanical Strength of Brittle Polycrystalline Specimens on Porosity and Grain Size // Amer. J. Ceramic. Soc. 1959, V.42, No 8, P. 376–387. URL: https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1959.tb13596.x

46. Garishin O.C., Moshev V.V., Modelling of mechanical behaviour of damageable particulate composites, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 31, Issue 1, 1999, Pages 61-66, ISSN 0167-8442. URL: https://doi.org/10.1016/S0167-8442(98)00067-6.

47. Scott G.D. Radial distribution of the random close packing of equal spheres. Nature. 1962. V. 194, № 9. P. 956–958.

48. Kilgour D.M. The density of random close packing of spheres. Brit. J. Appl. Phys. Ser. 2. 1969. V. 2. P. 863–866.

49. Займан Дж. Модели беспорядка. Теоретическая физика однородно неупорядоченных систем. Москва : Мир, 1982. 592 с.

50. Рыбьев И.А. Асфальтовые бетоны. Москва, 1969. С. 300.

51. Więckowski A., Strek F. Porowatosc mieszanin cial sypkich. Mieszaniny dwuskładnikowe. Chemia stosowana. 1966. № IB. P. 95–127.

52. Więckowski A., Strek P. Porowate rial sypkich. Mieszaniny wieloskładnikowe. *Chemia stosowana.* 1966. №4b. p. 431–447.

53. Иванов В.А., Мошев В.В. Плотность упаковки сыпучих сред. *Структурная механика неоднородных сред.* Свердловск, 1982. С. 19–27.

Information about author:
Kudryavtsev P. G.,
Candidate of Chemical Sciences, Professor,
Deputy Director of R&D,
Polymate Ltd – Israel Nanotechnology Research Center,
Editor in Chief of the Journal
“Scientific Israel-Technological Advantages”
POBox 73, Migdal HaEmek 2310001, Israel

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.9

PROSPECTS FOR THE USE OF ALCOHOL INFUSIONS IN ALCOHOLIC BEVERAGE TECHNOLOGIES FOR RESTAURANTS

Kuzmin O. V., Rudyi V. V.

INTRODUCTION

Nowadays, the use of vegetable raw materials in the technology of alcoholic beverages is being increasingly used in restaurants[1]. Due to the content of antioxidants (vitamins, flavonoids, tannins, organic acids, etc.), plant raw materials are capable of exhibiting antioxidant properties[2,3,4]. Antioxidants include substances that can inhibit the radical oxidation of organic and macromolecular compounds[5]. Antioxidants are able to reduce the output of oxidation products[6]: hydroperoxides, alcohols, aldehydes, ketones, fatty acids and the like.

A wide range of alcoholic beverages is based on the use of a variety of vegetable raw materials. Semi-finished products (aromatic alcohols, infusions, alcoholic juices, fruit drinks, etc.) are prepared from vegetable raw materials. On the one hand, the use of vegetable raw materials allows you to shape the taste, aroma, color of alcoholic beverages. On

---

[1] Kuzmin O., Kovalchuk Y., Velychko V., Romanchenko N. Improvement technologies of aqueous-alcoholic infusions for the production of syrups. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2016. 4 (2). pp. 258–275.

[2] Breiter T., Laue C. Kressel G., Gröll S., Hahn A. Bioavailability and antioxidant potential of rooibos flavonoids in humans following the consumption of different rooibos formulations. *Food Chemistry*. 2011. 128 (215) pp. 338–347.

[3] Dube P., Meyer S., Marnewick J. L. Antimicrobial and antioxidant activities of different solvent extracts from fermented and green honeybush (Cyclopia intermedia) plant material. *South African Journal of Botany*. 2017. 110. pp. 184–193.

[4] Sentkowska A., Pyrzynska K. Investigation of antioxidant interaction between Green tea polyphenols and acetaminophen using isobolographic analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2018. 15910. pp. 393–397.

[5] Steenkamp V., Fernandes A.C., van Rensburg C.E.J., Jäger A.K. Antioxidant scavenging potential of South African export herbal teas. *South African Journal of Botany*. 2004. 70 (4). pp. 660–663.

[6] Fai-Chu Wong, Jianbo Xiao, Shaoyun Wang, Kah-Yaw Ee, Tsun-Thai Chai. Advances on the antioxidant peptides from edible plant sources. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. 99. pp. 44–57.

the other hand, when using vegetable raw materials, there are difficulties in ensuring the constant and predictable quality characteristics[7,8] of alcoholic beverages.

To date, the antioxidant properties of the prescription components and their combinations have not yet been well studied. Some studies require a mechanism for the influence of prescription components[9] on the level of toxicity of alcoholic beverages. Some components are potentially capable of increasing chronic ethanol toxicity.

The wide range and variety of alcoholic beverages is coupled with the ability to mix alcohol with many ingredients. Due to the different proportions of water-alcohol infusions of vegetable raw materials in the process of blending leads to new flavors that are completely different from each other, as well as their different beneficial properties.

But among all the useful properties, the main thing will be to change the redox reactions[10],[11]. Redox reactions affect the ratio of energy to support homeostasis. Homeostasis – relativity of dynamic constancy of composition and properties of internal environment and stability of basic physiological functions of an organism. This ensures the vital activity of any organism. The magnitude of this rate depends on the ratio and concentration of oxidized and reduced substances in the body, including substances coming from food and beverages, so one of the main factors in the regulation of redox reactions is the redox potential.

In the production of cocktails in restaurants, one of the possibilities of influencing the antioxidant properties of the product is the extraction of vegetable raw materials into alcoholic raw materials. This can improve organoleptic performance and the benefits of alcoholic cocktails.

---

[7] Dietrich I., Kuzmin O., Mikhailenko V. Comprehensive evaluation of the hot sweet soufflé dessert quality. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2017. 5 (1). pp. 92–102.

[8] Kuzmin O., Levkun K., Riznyk A. Qualimetric assessment of diets. *Ukrainian Food Journal*. 2017. 6 (1). pp. 46–60.

[9] Frolova N., Ukrainets A., Sylka I., Nemirich A., Kuzmin O. Separation of terpenes from lemon essential oil by selective fractionation under a vacuum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 2/11 (98). pp. 32–36.

[10] Gerolis L.G.L., Lameiras F.S., Krambrock K., Neves M.J. Effect of gamma radiation on antioxidant capacity of green tea, yerba mate, and chamomile tea as evaluated by different methods. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017. 130. pp. 177–185.

[11] Gullón B., Eibes G., Moreira M.T., Herrera R., Gullón P. Yerba mate waste: A sustainable resource of antioxidant compounds. *Industrial Crops and Products*. 2018. 113. pp. 398–405.

Due to the extraction of vegetable raw materials into alcohol-containing raw materials, the enrichment of nutrients is obtained, which leads to an increase in the antioxidant properties of the solution.

These circumstances determine **the relevance of the topic** of scientific work, which is the development of water-alcohol infusions of vegetable raw materials in the technology of alcoholic beverages in restaurants. Creating low-toxicity alcoholic beverages through the introduction of herbal infusions with antioxidant properties allows restaurant establishments to create new products. This distinguishes them from competitors, creating a favorable image of an institution that cares about protecting consumers from the negative effects of alcohol.

The purpose of the work is to develop the scientific bases of antioxidant activity of water-alcohol infusions from vegetable raw materials and to identify the most promising plants as sources of natural antioxidants in the creation of alcoholic beverages in restaurants.

When achieving this goal, it is necessary to solve the following **problems:**

– to substantiate the prospect of using water-alcohol infusions from vegetable raw materials in the production of alcoholic beverages;

– to establish the value of the restorative capacity of water-alcohol infusions from vegetable raw materials;

– to conduct an organoleptic evaluation of water-alcohol infusions and to determine their prospects in alcoholic beverage technology;

– identify the most promising sources of natural antioxidants for use in alcoholic beverage technology;

– identify the best modifications of alcoholic beverages;

– to develop the prescription composition of alcoholic beverages.

Object of study: characteristics and quality indicators of water-alcohol infusions from vegetable raw materials: organoleptic characteristics (color, smell, taste); physicochemical indicators (hydrogen index – pH level, redox potential).

Subject of study: vodka with a volume fraction of ethyl alcohol – 40% (control); vegetable raw materials – tea products; water-alcohol infusions from vegetable raw materials; cognac.

Research methods: redoxmetry – determination of antioxidant capacity of water-alcohol infusions of vegetable raw materials; pH-metric; methods of determining organoleptic parameters.

Research methodology. The vegetable raw material was ground to 3x3 mm, placed a 4 g sample in glass vials, filled with 100 ml alcohol-containing solvent with 40% vol. The vials were closed with lids for

10 days with stirring. The infusions were filtered and studies were conducted to determine the hydrogen index, which was measured on a pH meter in the pH level mode with a combined glass electrode. The redox potential was measured in the potential measurement mode with the combined redoxmetric platinum electrode.

The scientific novelty is:

– identification of groups of water-alcoholic infusions for the production of alcoholic beverages by antioxidant activity: infusions with low activity (from 0 to 100 mV) – 0 samples; infusions with average activity (from 100 to 200 mV) – 12 samples; infusions with high activity (from 200 mV) – 1 sample;

– the minimum theoretically expected value of redox potential (RP_{min}) for water-alcohol infusions has been determined, which has a value from 283.8 mV (infusion of yellow tea) to 465.3 mV (infusion of hibiscus tea), and the actual measured of redox potential (RP_{act}) – from 92.5 mV (infusion of yellow tea) up to 228 mV (infusion of hibiscus tea);

– the minimum value of the restorative ability (recovery energy – RE), which is equal to – 123.2 mV and is characteristic for the honeybush infusion, and the largest value of 237.3 mV is the water-alcohol infusion from the hibiscus tea;

– found that the pH level for water-alcohol infusions has a value from 3,245 (infusion of hibiscus tea) to 6,27 (infusion of yellow tea), that is, the infusions have reactions from acidic to neutral;

– establishment of the most promising samples of water-alcohol infusions, which have received high organoleptic characteristics and can be recommended in the technology of alcoholic beverages – the infusion of hibiscus tea and red tea – 9.66 points.

Testing of research results. The main provisions and results of the experimental work were tested during the tasting of new developments at the Department of Technology of Restaurant and Ayurvedic Products of the National University of Food Technologies.

The socio-economic importance of the results obtained is the creation of semi-finished products – water-alcohol infusions of vegetable raw materials for alcoholic beverages with improved consumer properties.

1. Characterization of the technological process of alcohol production

Water-alcohol infusion is a semi-finished product of liqueur-vodka production, which is prepared by infusion of vegetable raw materials

(aromatic and non-aromatic) in aqueous-alcoholic solution with a strength of 40% to 90%, according to the technological instruction and the technological regulations with the observance of state sanitary rules and regulations.

Water-alcohol infusions are obtained by extraction with water-alcohol liquid of dried vegetable raw materials. In the process of extraction, the phenomenon of diffusion based on equalization of concentrations between the solvent and the solution of substances contained in the plant cell is used. This equalization of concentrations is expressed in the gradual mutual penetration of two substances bordering each other, and is caused by the chaotic motion of molecules, their kinetic energy.

The degree of extraction of soluble substances depends on the degree of grinding of raw materials; the ratio of raw materials and water-alcohol mixture; the concentration of alcohol in the aqueous-alcohol mixture; duration of infusion; numbers of raw material bay; mixing frequencies; temperature.

The simplest method of extraction is double infusion (maceration) at normal temperature, which consists of the following operations: raw material acceptance and weighing; sorting of raw materials and disposal of waste; waste weighing; grinding of raw materials; preparation of water-alcohol mixture of the required strength; loading of raw materials into a full container; pouring raw materials with a water-alcohol mixture; infusion of raw materials with a water-alcohol mixture with daily stirring for 5–14 days, depending on the type of raw materials; draining and pumping the infusion of the first drain into storage compartments and measuring the volume of infusion received; the second raw material feed with an aqueous-alcoholic mixture; re-infusion of raw materials with water-alcohol mixture with daily stirring for 5–10 days; draining, pumping and measuring the volume of the infusion of the first and second drains; mixing of infusions of the first and second drains; unloading of spent raw materials from an insulated container; evaporation of the alcohol remaining in the raw material.

Due to the infusion of tea products in the aqueous-alcoholic environment is extracted tannins substances, caffeine, vitamins, organic acids, essential oils, minerals, which lead to an increase in antioxidant properties and increase the time of sale of finished products.

2. Classification of tea products

Tea products include a group of foodstuffs including tea with additives, tea drink, instant tea, instant tea with additives, soluble tea

drink, liquid concentrate of tea, liquid concentrate of tea with additives, liquid concentrate of tea drink, cold tea, and mate, hibiscus tea, rooibos, honeybush, catuaba.

Tea with additives is a food product containing at least 50% by weight of tea and other components.

Tea drink is a food product made from vegetable raw materials with a possible addition of tea in an amount of not more than 50% by weight and other components.

Instant tea is a dry food product soluble in water at the temperature specified in the manufacturer's instructions and containing at least 1.0 g of dry tea extract per 1 dm3 infusion and containing no other components. Instant Tea with Supplements is a dry food product soluble in water at the temperature specified in the manufacturer's instructions and containing at least 1.0 g of dry tea extract per 1 dm^3 infusion and containing other components.

Instant tea drink is a dry food product soluble in water at the temperature specified in the manufacturer's instructions, with a possible content of dry tea extract of less than 1.0 g per 1 dm^3 infusion and a total content of dry tea extract and dry vegetable extract of not less than 1.0 g on 1 dm^3 infusion. The presence of other food components is allowed.

Liquid tea concentrate is a liquid food product soluble in water containing at least 1.0 g of dry tea extract per 1.0 dm^3 infusion and containing no other components. Liquid tea concentrate with additives is a liquid food product soluble in water containing at least 1.0 g of dry tea extract per 1 dm^3 of infusion and containing other components.

Liquid tea beverage concentrate is a liquid food product soluble in water, with a possible dry tea extract content of less than 1.0 g per 1 dm^3 infusion and a total dry tea extract content and dry vegetable extract of at least 1.0 g per 1 dm^3 infusion. The presence of other food components is allowed.

Cold tea is a liquid food product containing a dry tea extract and / or a dry vegetable extract in a total concentration of at least 1.0 g per 1 dm^3, ready for consumption. The presence of other food components is allowed.

3. Characteristics of the raw material used in the studies

Black tea[12] is a type of tea that is obtained by completely or almost completely oxidizing the leaf of the tea bush.

Yellow tea is a rare variety of high quality Chinese tea. Yellow tea is generally similar to green tea, but has some differences in production technology, namely the slow drying stage. This technological technique gives the yellow tea a special flavor, for which it is appreciated.

Red tea is the most fermented tea that is called in China for its infusion color. It is characterized by burgundy, amber and chestnut shades, rich aroma and a tart taste.

White tea is a low-oxidized type of tea. White tea has an extremely delicate aroma, which very easily absorbs the surrounding scents. That is why tea collectors are forbidden from eating onions, garlic, and spices, otherwise they can ruin the original flavor of the tea.

Green Tea[13,14] – the kind of tea that is achieved through the processing of tea leaves: wilting + partial drying + twisting + drying. The main task in the manufacture of green tea – to preserve its biologically active natural substances contained in the tea leaf. That is why the process of making this kind of tea is not "aggressive" and is subordinated to the goal of preserving the nutrients in the leaf. Green tea contains a large amount of caffeine and with prolonged brewing it can start to get bitter. Properly brewed green tea contains a unique blend of vitamins, trace elements and other nutrients (such as plant proteins).

Mate[15,16,17] (Paraguay Tea) is a dry leaf of an evergreen shrub of Paraguayan holly. Mate is known for its supposedly rich healing

---

[12] Gulua L., Nikolaishvili L., Jgenti M., Turmanidze T., Dzneladze G. Polyphenol content, anti-lipase and antioxidant activity of teas made in Georgia. *Annals of Agrarian Science*. 2018. 16 (3). pp. 357–361.

[13] Gerolis L.G.L., Lameiras F.S., Krambrock K., Neves M.J. Effect of gamma radiation on antioxidant capacity of green tea, yerba mate, and chamomile tea as evaluated by different methods. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017. 130. pp. 177–185.

[14] Sentkowska A., Pyrzynska K. Investigation of antioxidant interaction between Green tea polyphenols and acetaminophen using isobolographic analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2018. 15910. pp. 393–397.

[15] Gerolis L.G.L., Lameiras F.S., Krambrock K., Neves M.J. Effect of gamma radiation on antioxidant capacity of green tea, yerba mate, and chamomile tea as evaluated by different methods. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017. 130. pp. 177–185.

properties and contains a lot of caffeine. The drink should be bitter. Has a specific aroma. The taste is reminiscent of strong green tea.

Hibiscus[18] tea is a sweet-sour-flavored drink of bright red color, made from dried Rosella flowers. Hot tea is drunk as a cool drink in the heat.

Rooibos[19] – a drink obtained by brewing dried crushed leaves and shoots of Aspalathus linearis.

Honeybush[20] – a drink ("herbal tea"), which is made from some species of South African plants belonging to the genus Cyclopia.

Catuaba[21] – made for the infusions of the bark of a number of trees, originally from Brazil. The bark infusion is used in traditional Brazilian medicine as a stimulant and central nervous system stimulant.

4. Materials and methods

The main tool that provides the vital activity of any organism and regulates the ratio of the amount of energy to maintain homeostasis (the relative dynamic constancy of the composition and properties of the internal environment and the stability of the basic physiological functions of the body) and spent on the regeneration of cells of the body, is a change in the rate of reactions of organisms. This rate depends on the

---

[16] Gullón B., Eibes G., Moreira M.T., Herrera R., Gullón P. Yerba mate waste: A sustainable resource of antioxidant compounds. *Industrial Crops and Products*. 2018. 113. pp. 398–405.

[17] Pâmela T. A. N. Kungel, Vanesa G. Correa, Rúbia C. G. Corrêa, Rosely Aparecida Peralta, Rosane M. Peralta. Antioxidant and antimicrobial activities of a purified polysaccharide from yerba mate (Ilex paraguariensis). *International Journal of Biological Macromolecules.* 2018. 11415. pp. 1161–1167.

[18] Nasir A. Siddiqui, Hanan M. Al-Yousef, Tawfeq A. Alhowiriny, Perwez Alam, Rehab H. Abdallah. Concurrent analysis of bioactive triterpenes oleanolic acid and β-amyrin in antioxidant active fractions of Hibiscus calyphyllus, Hibiscus deflersii and Hibiscus micranthus grown in Saudi Arabia by applying validated HPTLC method. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 2018. 26, pp. 266–273.

[19] Joubert E., de Beer D. Phenolic content and antioxidant activity of rooibos food ingredient extracts. *Journal of Food Composition and Analysis.* 2012. 27 (1). pp. 45–51.

[20] J. D. van der Merwe, D. de Beer, S. Swanevelder, E. Joubert, W. C. A. Gelderblom. Dietary exposure to honeybush (Cyclopia) polyphenol-enriched extracts altered redox status and expression of oxidative stress and antioxidant defense-related genes in rat liver. *South African Journal of Botany*. 2017. 110. pp. 230–239.

[21] Jean Paul Kamdem, Elekofehinti Olusola Olalekan, Waseem Hassan, Ige Joseph Kade, João Batista Teixeira Rocha. Trichilia catigua (Catuaba) bark extract exerts neuroprotection against oxidative stress induced by different neurotoxic agents in rat hippocampal slices. *Industrial Crops and Products*. 2013. 50. pp. 625–632.

concentration and the ratio of oxidized and reduced forms of substances in the body, so one of the most significant factors regulating the parameters of redox reactions is the redox potential.

The redox potential quantitatively determines the activity of ions in redox reactions and characterizes the deviation from the ionic balance of free electrons, whose change in concentration leads to a change in the electron charge of the liquid medium. In addition, the redox potential characterizes the biological activity of the liquid medium, which affects biological systems and allows the energy of these processes to be evaluated. The positive value of the redox potential is due to the decrease in the activity of the electrons in the solution, which indicates the oxidizing ability, the redox potential with the negative value is determined by the increase in the activity of the electrons and indicates the restorative capacity.

At redoxmetry (measurement on a platinum electrode relative to a chlorine silver reference electrode) the redox potential of the internal environment of a healthy human body is less than zero (-100… -200 mV). In this case, the redox potential of drinking water from the urban water supply network, depending on the location of the water intake, the time of year, the water treatment system (except for electrochemical activation) is always greater than zero (+100… +400 mV).

These differences of redox potential of the internal environment of the human body and drinking water mean that the activity of electrons in the internal environment of the body is much higher than the activity of electrons in drinking water. In the body there is a necessary change in the redox potential of drinking water due to the consumption of electrical energy of cell membranes, is energy of the highest level, energy, which is actually the end product of the biochemical chain of nutrient transformation. The amount of energy consumed by the body to achieve the biological compatibility of water is proportional to its amount and the difference of the redox potential of water and the internal environment of the body.

In addition to drinking water, a person consumes water and water-alcohol mixtures, food, the redox potential of which is positive. When such products get into the body tissues, electrons are removed from cells and tissues, which are 80-90% composed of water. As a result, the biological structures of the organism (cell membranes, cell organoids, nucleic acids, etc.) are subjected to oxidative destruction, the organism wears out, ages, and vital organs lose their function.

When aqueous solutions (food) with a negative redox potential close to the values of the redox potential of the internal environment of the human body enter the body, the electrical energy of the cell membranes is not spent on the correction of the activity of the electrons of aqueous solutions (food), so the products are immediately assimilated because they have biological compatibility under this parameter.

If aqueous solutions (food) have a redox potential more negative than the redox potential of the internal environment of the body, then they feed it with this energy, which is used by cells as an energy reserve of antioxidant protection of the body against the adverse effects of the external environment.

We can conclude that in order for the human body to optimally use in the metabolic processes aqueous solutions (food), the values of redox potential must correspond to the values of redox potential of the internal environment of the organism, or have more negative values.

The quantitative characteristic of the acidity or alkalinity of the aqueous medium is the hydrogen index (pH), which is determined by the activity of hydrogen ions (a_{H^+}) or, otherwise, by the ratio of the concentration of hydroxonium ions H_3O^+ and hydroxyl OH^-, whereas the acidity and alkalinity characterize the quantitative content in the aqueous medium capable of neutralizing with alkali and acid.

The pH of aqueous solutions is in the range from 0 to 14. If the water content of H_3O^+ is reduced compared to OH^- ions, then the water will have an alkaline reaction (pH>7), with an increased content of H_3O^+ ions – acidic (pH<7), with equal concentrations of H_3O^+ ions and OH^- – neutral (pH=7).

There is a relationship between the redox potential and the pH level, which is expressed by the fact that when the pH of the water changes by 1 unit. by the addition of sodium hydroxide or hydrochloric acid, the redox potential changes accordingly by about 59 mV – increases with decreasing pH and decreases with increasing it.

To evaluate the pH and redox potential (RP) of solutions, the following formula is valid:

$$RP_{min}=660-60\cdot pH, \text{ mV} \quad (1)$$

where RP_{min} – the minimum theoretically expected value of the redox potential; pH – the hydrogen index of the test solution.

The acquired values of RP_{min} are compared with actual measurements of RP_{act} of solution. The shift of the redox potential towards the recovery values, as the recovery energy (RE), is determined by the formula:

$$RE=RP_{min}– RP_{act}, mV \quad (2)$$

where RE – the energy of recovery (restorative capacity); RP_{act} – the actual measured redox potential of the solution.

It can be concluded that the use of water-alcohol infusions from tea products with specified values of redox potential, will allow their use as semi-finished products for the production of alcoholic beverages, which are able to change the speed and direction of redox processes in the body, regulate biological and slow down negative processes in the human body. The result will be a product with protective restorative properties.

5. Results and discussions

In the first stage, water-alcohol infusions were created according to the following scheme. Teas (black, red, yellow, white, green) and tea products (mate, hibiscus, rooibos, honeybush, catuaba) were placed in a container for infusion and spent the first pour in the volume of water-alcohol mixture and infused for 5 days at room temperature, periodically stirring the raw materials. During the first bay infusions of the 1st shower were received. A second feed of the raw material was carried out with an aqueous-alcoholic mixture, followed by infusion for 5 days. In the process, infusions of the second shower were received. The obtained infusions of the 1st and 2nd drains were mixed and received water-alcohol infusions. After all stages of preparation of water-alcohol infusions, their studies were performed according to organoleptic and physicochemical parameters (Table 1. and Fig. 1-7).

The control sample of the aqueous-alcoholic solution at t=20° C has a value of pH=5.63, RP_{min}=322.2 mV, RP_{act}=181.0 mV, RE=141.2 mV. Organoleptic control properties with an overall score of 9.50 points.

The sample of infusion of black tea at t=20° C has a value of pH=5.48, RP_{min}=331.2 mV, RP_{act}=152.5 mV, RE=178.7 mV. Organoleptic control properties with an overall score of 9.62 points.

Table 1

Characteristics of water-alcohol infusions of tea and tea products

Raw materials	Organoleptic values, scores	Hydrogen index, pH units	RP_{min}, mV	RP_{act}, mV	RE, mV
Water-alcohol mixture	9,50	5,630	322,2	181,0	141,2
Infusion of black tea	9,62	5,480	331,2	152,5	178,7
Infusion of yellow tea	9,63	6,270	283,8	92,5	191,3
Infusion of red tea	9,66	5,550	327,0	146,5	180,5
Infusion of white tea	9,64	6,230	286,2	97,0	189,2
Infusion of green tea	9,63	6,160	290,4	105,0	185,4
Infusion with mate	9,63	5,735	315,9	131,1	184,8
Infusion of hibiscus	9,66	3,245	465,3	228,0	237,3
Infusion of rooibos green	9,60	5,500	330,3	176,0	154,3
Infusion of rooibos	9,63	5,410	335,4	209,5	125,9
Infusion of honeybush green	9,58	5,440	333,9	185,5	148,4
Infusion of honeybush	9,56	5,210	347,7	224,5	123,2
Infusion of catuaba	9,65	5,420	335,1	168,5	166,6

The minimum theoretically expected value of the redox potential (RP_{min}) for water-alcohol infusions ranges from 283.8 mV (infusion of yellow tea), to 465.3 mV (infusion of hibiscus tea), the actual measured redox potential of the solution (RP_{act}) – from 92.5 mV (infusion of yellow tea) to 228 mV (hibiscus tea infusion).

The minimum recovery energy (RE) – 123.2 mV and is characteristic of the honeybush infusion, and the largest value of 237.3 mV is water-alcohol infusion from the hibiscus tea.

The pH level for water-alcohol infusions ranges from 3.245 (infusion of hibiscus tea) to 6.27 (infusion of yellow tea), ie infusions have reactions from acidic to neutral.

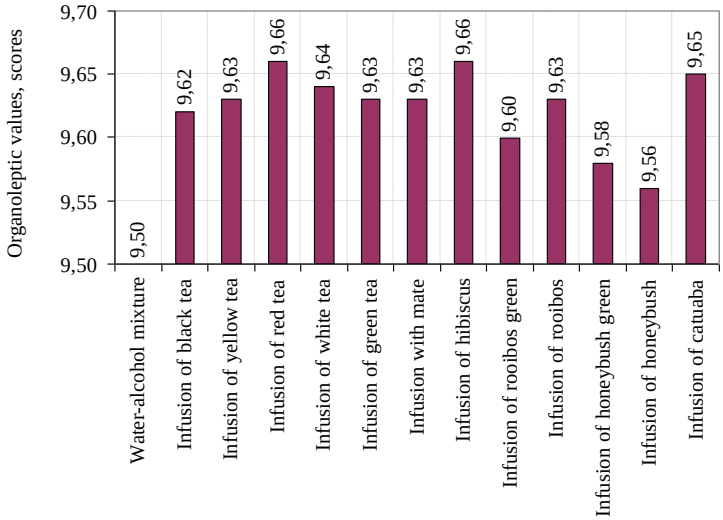


Fig. 1. Organoleptic characteristics of water-alcohol infusions

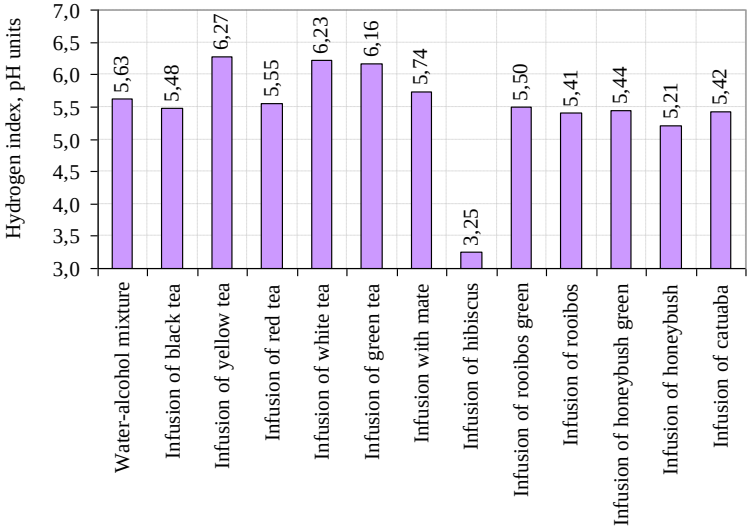


Fig. 2. pH level of water-alcohol infusions of vegetable raw materials

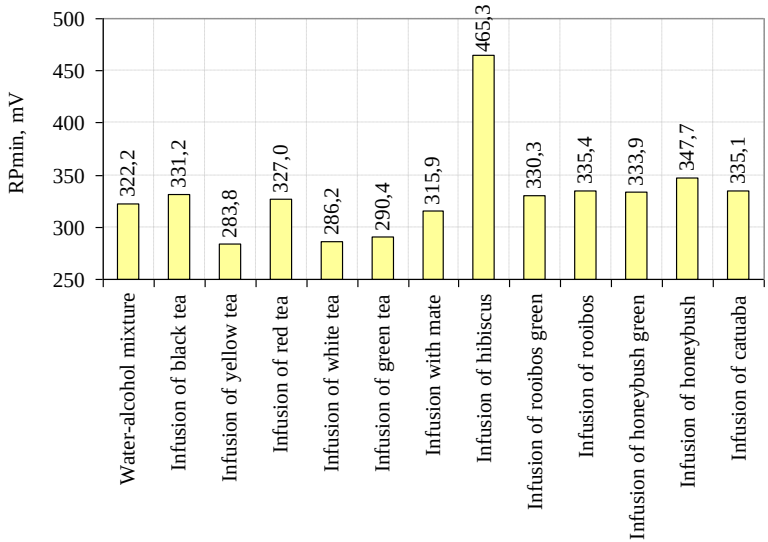


Fig. 3. RP_{min} of water-alcohol infusions of vegetable raw materials

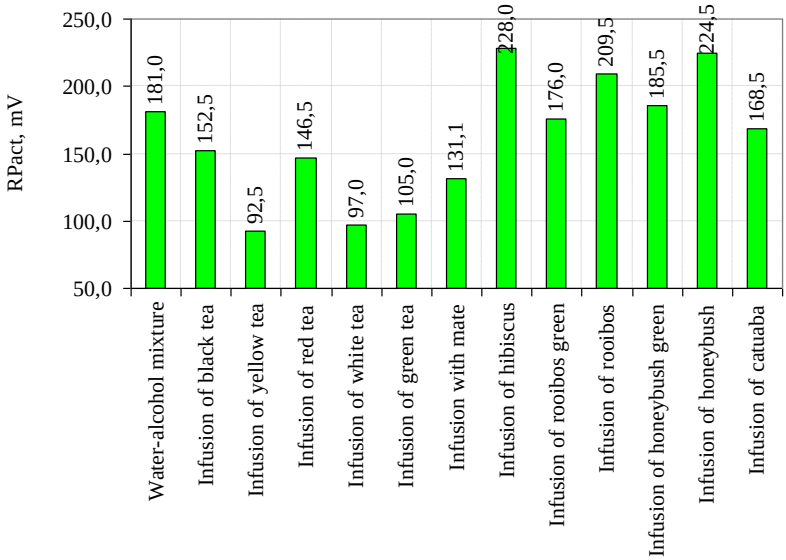


Fig. 4. RP_{act} of water-alcohol infusions of vegetable raw materials

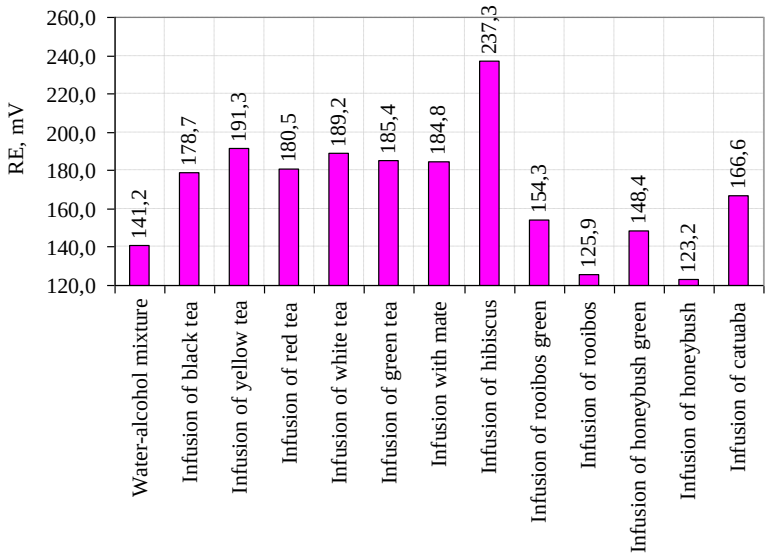


Fig. 5. RE of water-alcohol infusions of vegetable raw materials

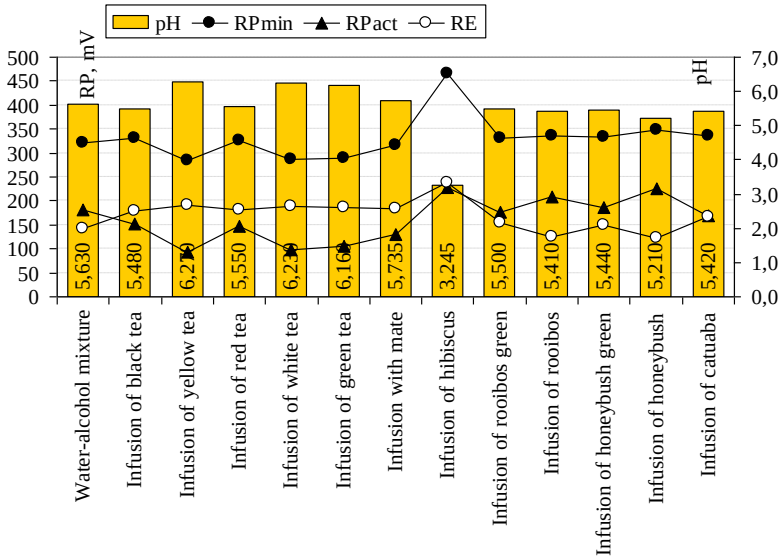


Fig. 6. Physicochemical characteristics of water-alcohol infusions

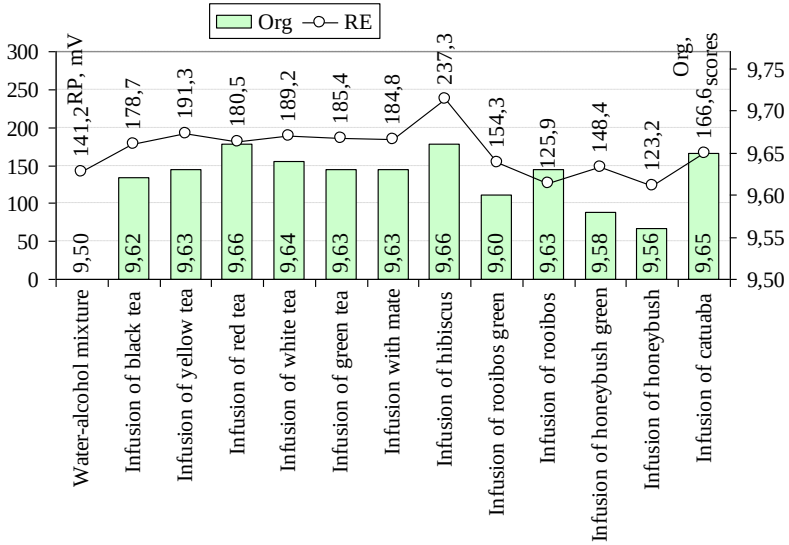


Fig. 7. Physicochemical and organoleptic characteristics of water-alcohol infusions

The most promising samples of water-alcohol infusions, which have high organoleptic characteristics and can be recommended in the technology of alcoholic cocktails – infusions of hibiscus tea and red tea – 9.66 points.

The groups of water-alcohol infusions for the production of alcoholic cocktails by antioxidant activity were determined: infusions with low activity (from 0 to 100 mV) – 0 samples; infusions with average activity (from 100 to 200 mV) – 12 samples; infusions with high activity (from 200 mV) – 1 sample.

For blending of alcoholic beverage was added (Table 2): water-alcohol infusion of tea products – 38,49%, cognac – 7,54%, vanillin 1:10 – 0,01%, sugar syrup 65,8% – 53,08 %, citric acid – 0.28%, “color” – 0.6%, rectified ethyl alcohol and water – based on the strength of 20% (Fig. 8).

Table 2

Ingredients content

Water-alcohol infusion of tea products,%	Cognac,%	Vanillin 1:10,%	Sugar syrup 65,8%,%	Citric acid, %	Color%
38,49	7,54	0,01	53,08	0,28	0,6

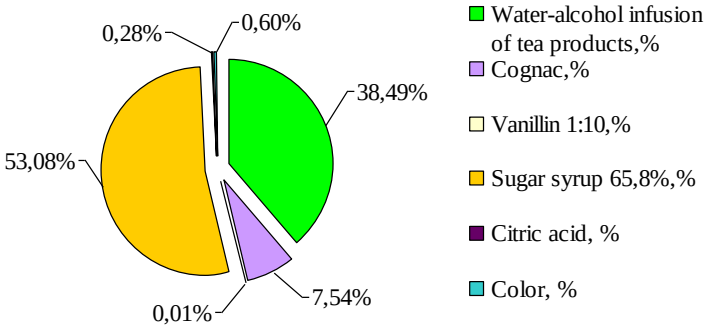


Fig. 8. Blending of alcoholic beverage

CONCLUSIONS

The established perspective of ways of forming consumer properties and expanding the range of alcoholic cocktails is the use of different infusions of tea products. Such substances or their combinations are intended to improve the organoleptic properties of beverages, to give them stable therapeutic and prophylactic properties – to promote the promotion of human health (antioxidant, membrane-stabilizing effect, enhancing redox reactions and enhancing the normalization of the action hormonal status of the body).

SUMMARY

Creating low-toxicity alcoholic beverages allows a manufacturing company to market new products. It is these products that distinguish the range of manufacturers from the range of competitors, creating a favorable image of the company, which cares about protecting consumers from the negative effects of alcohol on the basis of the latest technologies.

Thus, the study of redox reactions occurring during the manufacture of water-alcohol infusions is important to ensure their stability and safety for consumption.

REFERENCES

1. Breiter T., Laue C. Kressel G., Gröll S., Hahn A. Bioavailability and antioxidant potential of rooibos flavonoids in humans following the consumption of different rooibos formulations. *Food Chemistry*. 2011. 128 (215). pp. 338–347. DOI 10.1016/j.foodchem.2011.03.029.

2. Dietrich I., Kuzmin O., Mikhailenko V. Comprehensive evaluation of the hot sweet soufflé dessert quality. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2017. 5 (1). pp. 92–102. DOI 10.24263/2310-1008-2017-5-1-12.

3. Dube P., Meyer S., Marnewick J.L. Antimicrobial and antioxidant activities of different solvent extracts from fermented and green honeybush (Cyclopia intermedia) plant material. *South African Journal of Botany*. 2017. 110. pp. 184–193. DOI 10.1016/j.sajb.2016.10.010.

4. Fai-Chu Wong, Jianbo Xiao, Shaoyun Wang, Kah-Yaw Ee, Tsun-Thai Chai. Advances on the antioxidant peptides from edible plant sources. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. 99. pp. 44–57. DOI 10.1016/j.tifs.2020.02.012.

5. Frolova N., Ukrainets A., Sylka I., Nemirich A., Kuzmin O. Separation of terpenes from lemon essential oil by selective fractionation under a vacuum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 2/11 (98). pp. 32–36. DOI 10.15587/1729-4061.2019.160220.

6. Gerolis L.G.L., Lameiras F.S., Krambrock K., Neves M.J. Effect of gamma radiation on antioxidant capacity of green tea, yerba mate, and chamomile tea as evaluated by different methods. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017. 130. pp. 177–185. DOI 10.1016/j.radphyschem.2016.08.017.

7. Gullón B., Eibes G., Moreira M.T., Herrera R., Gullón P. Yerba mate waste: A sustainable resource of antioxidant compounds. *Industrial Crops and Products*. 2018. 113. pp. 398–405. DOI 10.1016/j.indcrop.2018.01.064.

8. Gulua L., Nikolaishvili L., Jgenti M., Turmanidze T., Dzneladze G. Polyphenol content, anti-lipase and antioxidant activity of teas made in Georgia. *Annals of Agrarian Science*. 2018. 16 (3). pp. 357–361. DOI 10.1016/j.aasci.2018.06.006.

9. Jean Paul Kamdem, Elekofehinti Olusola Olalekan, Waseem Hassan, Ige Joseph Kade, João Batista Teixeira Rocha. Trichilia catigua (Catuaba) bark extract exerts neuroprotection against oxidative stress induced by different neurotoxic agents in rat hippocampal slices. *Industrial Crops and Products*. 2013. 50. pp. 625–632. DOI 10.1016/j.indcrop.2013.07.033.

10. J. D. van der Merwe, D. de Beer, S. Swanevelder, E. Joubert, W. C. A. Gelderblom. Dietary exposure to honeybush (Cyclopia) polyphenol-enriched extracts altered redox status and expression of oxidative stress and antioxidant defense-related genes in rat liver. *South African Journal of Botany*. 2017. 110. pp. 230–239. DOI 10.1016/j.sajb.2016.08.004.

11. Joubert E., de Beer D. Phenolic content and antioxidant activity of rooibos food ingredient extracts. *Journal of Food Composition and Analysis.* 2012. 27 (1). pp. 45–51. DOI 10.1016/j.jfca.2012.03.011.

12. Kuzmin O., Kovalchuk Y., Velychko V., Romanchenko N. Improvement technologies of aqueous-alcoholic infusions for the production of syrups. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2016. 4 (2). pp. 258–275. DOI 10.24263/2310-1008-2016-4-2-8.

13. Kuzmin O., Levkun K., Riznyk A. Qualimetric assessment of diets. *Ukrainian Food Journal.* 2017. 6 (1). pp. 46–60. DOI 10.24263/2304-974X-2017-6-1-7

14. Nasir A. Siddiqui, Hanan M. Al-Yousef, Tawfeq A. Alhowiriny, Perwez Alam, Rehab H. Abdallah. Concurrent analysis of bioactive triterpenes oleanolic acid and β-amyrin in antioxidant active fractions of Hibiscus calyphyllus, Hibiscus deflersii and Hibiscus micranthus grown in Saudi Arabia by applying validated HPTLC method. *Saudi Pharmaceutical Journal*. 2018. 26, pp. 266–273. DOI 10.1016/j.jsps.2017.11.013

15. Pâmela T. A. N. Kungel, Vanesa G. Correa, Rúbia C. G. Corrêa, Rosely Aparecida Peralta, Rosane M. Peralta. Antioxidant and antimicrobial activities of a purified polysaccharide from yerba mate (Ilex paraguariensis). *International Journal of Biological Macromolecules.* 2018. 11415. pp. 1161–1167. DOI 10.1016/j.ijbiomac.2018.04.020

16. Sentkowska A., Pyrzynska K. Investigation of antioxidant interaction between Green tea polyphenols and acetaminophen using

isobolographic analysis. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2018. 15910. pp. 393–397. DOI 10.1016/j.jpba.2018.07.029.

17. Steenkamp V., Fernandes A.C., van Rensburg C.E.J., Jäger A.K. Antioxidant scavenging potential of South African export herbal teas. *South African Journal of Botany*. 2004. 70 (4). pp. 660–663. DOI 10.1016/S0254-6299(15)30207-6.

Information about authors:
Kuzmin O. V.,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Technology
of Restaurant and Ayurvedic Products
National University of Food Technologies
68, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine

Rudyi V. V.,
Student of the National University of Food Technologies
68, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.10

НАНОТЕХНОЛОГІЯ ТА ПІДГОТОВКА СУЧАСНОГО ІНЖЕНЕРА У СВІТЛІ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИНЦИПІВ І ЗАВДАНЬ БОЛОНСЬКОГО ПРОЦЕСУ

Малишев В. В., Габ А. І.

ВСТУП

Сьогодні світова спільнота живе в очікуванні чергового технологічного прориву, пов'язаного з розвитком і вивченням технології з вищим ступенем застосування перспективних наукових розробок. Основні надії при цьому пов'язані з нанотехнологією, яка оперує структурами із розмірами порядку нанометра.

Нанотехнології ще перебувають на стадії початкового розвитку, проте вже зараз можливостей існуючих технологій досить, щоб створити з декількох молекул деякі прості механізми. Вони, керуючись сигналами, що надходять ззовні (акустичними, електромагнітними тощо), зможуть маніпулювати іншими молекулами і створювати собі подібні пристрої або складніші механізми. Ті ж своєю чергою зможуть виготовити ще складніші пристрої і так далі. Врешті-решт цей експоненційний процес приведе до створення молекулярних роботів – механізмів, порівняних за розмірами із великою молекулою, що мають власний убудований комп'ютер. У виготовленні таких нанокомп'ютерів немає нічого фантастичного, активні електронні елементи таких розмірів уже отримані в лабораторних умовах[1,2,3].

Природно, що в очікуванні певних надій, пов'язаних із застосуванням принципово нового підходу до технології, світові інвестиції в цю галузь постійно збільшуються. Слід відмітити, що

---

[1] Фейнман Р.Ф. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики. *Российский химический журнал*. 2002. Т. 46, № 5. С. 4-6.

[2] Бучаченко А.Л. Нанохимия – прямой путь к высоким технологиям нового века. *Успехи химии*. 2003. Т. 72, № 5. С. 419-437. https://doi.org/10.1070/RC2003v072n05ABEH000795

[3] Таланчук П., Малишев В. Становлення й розвиток нанотехнологій у світі і в Україні: використання інтелектуального капіталу, тенденції розвитку. *Університет «Україна»*. 2009. № 10-11. С. 3-4.

останніми роками створено понад 16 000 «нанокомпаній», і їх кількість постійно зростає. На це ще накладається розчарування, пов'язане з бумом у розвитку компаній в галузі інформаційних технологій, які стрімко розвивалися в 90-і роки, лавиноподібно нарощуючи рівень капіталізації, а потім багато хто з них зазнав краху. Разом з цим розробки в галузі наноматеріалів, наноінструментів, наноелектроніки і нанобіотехнології вже починають приносити комерційну віддачу.

Провідні країни світу давно оцінили інноваційний потенціал нанотехнологій і створили відповідні національні програми. На частку США нині припадає приблизно третина всіх світових інвестицій у нанотехнології. Інші головні гравці на цьому полі – Європейський Союз (приблизно 15%) і Японія (20%). Дослідження в цій сфері активно ведуться також у країнах колишнього СРСР, Австралії, Канаді, Китаї, Південній Кореї, Ізраїлі, Сінгапурі і Тайвані. Проте Україна в цьому напрямі значно відстає від технологічно розвинених країн, причому відставання має не технологічний, а інтелектуальний характер. Дійсно, налагодження виробництва шляхом залучення зарубіжних інвестицій і створення нових підприємств не вирішує проблем у розвитку суспільства, зводячи країну просто до джерела дешевої робочої сили. Необхідно насамперед розвивати освіту в цій галузі, підвищувати рівень підготовки інженерних кадрів, чим завжди славилася наша країна. Через це підготовка інженерних кадрів повинна кардинально якісно змінитися[4].

1. Використання нанотехнологій і наноматеріалів – один із визначальних чинників наукового, економічного й оборонного розвитку держав

Зараз практично у всіх сучасних вищих навчальних закладах викладають курс нанотехнології. Природно, що це відбувається і в Україні, проте відчувається якась невизначеність у виборі матеріалу і в побудові лекційного процесу. Для цього можна запропонувати наступну програму курсу цієї дисципліни, призначеного, швидше, для студентів спеціальностей, пов'язаних з електронікою. Проте, на

[4] Таланчук П., Малишев В., Липова Л. Освіта XXI століття. Самовизначення особистості в контексті інтеграції України до Європейського інтелектуального простору. *Освіта регіону. Політологія, психологія, комунікації*. 2009. № 3. С. 206–213.

нашу думку, знайомство з основними поняттями нанотехнології повинне увійти до арсеналу інженера будь-якої спеціальності. Відразу зазначимо, що програма курсу наразі має рекомендаційний характер і повинна ще зазнати кардинальних змін і переробок.

Отже, основне завдання полягає в тому, щоб студенти після закінчення курсу були в змозі розуміти і сприймати такі поняття: особливості провідності в наномасштабах, техніка виробництва нанопристроїв, методика використання нанотехнологічних пристроїв. Для цього достатньо 12 основних лекцій з тем:

1) основні величини і масштаби в наногалузі;
2) технологія виробництва і експериментального дослідження;
3) елементи квантової механіки і статистичної фізики;
4) тунелювання;
5) одноелектронний транзистор;
6) напівпровідникові наноструктури на поверхні;
7) елементи теорії провідності в нанопристроях;
8) одновимірні провідники;
9) квантування опору, квантовий точковий контакт;
10) вуглецеві нанотрубки;
11) елементи квантової теорії інформації і квантові комп'ютери;
12) біонаноелектроніка.

Природно, що такі широкі питання неможливо викласти в лекційному курсі, тому особлива увага має приділятися самостійній роботі і проведенню консультацій. Разом з цим важливо, щоб конспективно лекційний курс містився на сторінці лектора в мережі. З іншого боку, сьогодні в Інтернеті вже так багато лекційних курсів та інформації з нанотехнологій, що проблеми, вирішенню яких якраз і служить цей лекційний курс, будуть лише у виборі матеріалу.

Слід зазначити, що останнім часом спостерігається певна тенденція щодо зниження вартості експериментального й технологічного устаткування. Іншими словами, не потрібно багато грошей, щоб купити, наприклад, установку з тунельної мікроскопії або з епітаксії за простою методикою. Тому головне – знати, що треба і можна зробити в цій галузі. З іншого боку, тут навіть найменший результат привертає велику увагу – це, по суті, і визначається назвою «нанотехнологія».

За багатьма прогнозами розвиток нанотехнологій визначить обличчя XXI століття. Оскільки нанонауки не є спеціальною галуззю знань, дослідження в нанорозмірній галузі ведуться й у

фізиці, і в хімії, і в біології. А ще частіше – на стику наук. Важливі нанопроєкти мають міжгалузевий характер і вимагають нових організаційних підходів для їх реалізації та відповідної підготовки кадрів.

Нанонаука зародилась на стику фізики конденсованих систем, неорганічної та фізичної хімії, біохімії, електроніки і є інтегрувальною наукою типу кібернетики. Вона відображає сучасну, притаманну насамперед електроніці, тенденцію до мініатюризації та визначає межі зменшення структурних одиниць різноманітних пристроїв. У певному сенсі нанонаука є своєрідним містком між атомно-молекулярним та колоїдно-дисперсним рівнями матеріальних об'єктів[5],[6].

У аспекті виготовлення та використання нанорозмірних об'єктів нанотехнологію можна розглядати як процес створення і використання матеріалів нанорозмірного масштабу на рівні груп атомів, молекул і надмолекулярних структур. Наноструктури, виготовлені з таких «будівельних» блоків, є найменшими об'єктами, створеними людиною.

Нанометровий діапазон вимірів розмірами 1–100 нм відкриває нові властивості й підходи до вивчення речовини. В цьому діапазоні кардинально змінюється чимало фізичних та хімічних властивостей. В ньому так, як ніде, близько сходяться фізика, хімія й біологія та слід очікувати на появу нових явищ і ефектів, нових фундаментальних принципів, які геніально прогнозував лауреат Нобелівської премії в галузі фізики Р. Фейман ще в 1959 р.

Необхідно відмітити, що нанометрові об'єкти добре відомі ще з позаминулого і минулого століть, як, наприклад, колоїди чи гетерогенні каталізатори, які включають наночастинки на поверхні носіїв. Однак в останнє десятиріччя XX століття окреслилися такі поняття, як нанокластер, наноструктура і пов'язані з ними явища, та виділилися в окрему галузь фізико-хімії. Це сталося головним чином внаслідок значного прогресу в отриманні й дослідженні нанооб'єктів, появи нових наноматеріалів, нанотехнологій і нанопристроїв. Синтезовані нові гігантські нанокластери ряду металів, фулерени і вуглецеві нанотрубки, чимало наноструктур на їх основі та на базі

---

[5] Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. Nanotechnology News Network, 2005. 444 с.

[6] Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Москва, Academia, 2005. 192 с.

супрамолекулярних гібридних органічних та неорганічних полімерів тощо. Досягнуто помітного прогресу у методах спостереження – вивчення властивостей нанокластерів і наноструктур, пов'язаного з розвитком тунельної і сканувальної мікроскопії, рентгенівських та оптичних методів з використанням синхронтонного випромінювання, оптичної лазерної, радіочастотної, мессбауерівської спектроскопії тощо. Отже, предмет фізико-хімії нанокластерів має включати способи отримання нанокластерів і наноструктур, їх властивості та використання у вигляді наноматеріалів, що мають вихід на нанотехнологію.

Серед основних складників науки про наноматеріали й нанотехнології можна виділити такі[7]:

– фундаментальні дослідження властивостей матеріалів на наномасштабному рівні;

– розвиток нанотехнологій як для цілеспрямованого створення наноматеріалів, так і для пошуку та використання природних об'єктів з наноструктурними елементами;

– створення готових виробів із використанням наноматеріалів та інтеграція наноматеріалів і нанотехнологій у різні галузі промисловості та науки;

– розвиток засобів і методів дослідження структури та властивостей наноматеріалів, а також методів контролю й атестації виробів і напівфабрикатів для нанотехнологій.

Початок XXI століття ознаменувався революційним початком розвитку нанотехнологій та наноматеріалів. Вони вже використовуються у всіх розвинених країнах світу у найбільш значущих сферах людської діяльності (промисловості, обороні, інформаційній сфері, радіоелектроніці, енергетиці, транспорті, біотехнології, медицині). Аналіз зростання інвестицій, кількості публікацій з даної тематики і темпів впровадження фундаментальних та пошукових розробок дозволяє зробити висновок про те, що в найближчі 20 років використання нанотехнологій і наноматеріалів буде одним із визначальних чинників наукового, економічного та оборонного розвитку держав. За багатьма прогнозами саме розвиток нанотехнологій визначить обличчя XXI століття, подібно до того, як

[7] Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Кротов. А.М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологи получения. Москва, Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 2007. 125 с.

відкриття атомної енергії, винахід лазера і транзистора визначили обличчя XX століття. А деякі експерти навіть передбачають, що XXI століття буде століттям нанотехнологій (за аналогією з тим, як XIX століття називали століттям пари, а XX століття – століттям атома і комп'ютера).

Досягнення в розробці та виготовленні наноструктур найбільшою мірою визначаються рівнем розвитку технологій, які дають змогу з атомною точністю отримувати наноструктури необхідної конфігурації та розмірності, а також методів комплексної діагностики властивостей наноструктур, включаючи контроль у процесі виготовлення (in situ) і керування на його основі технологічними процесами. Важливі наукові й технічні досягнення, що ґрунтуються на розумінні й керуванні процесами на рівні атомів і молекул – нанорівні, – здійснюються в лабораторіях усього світу. Наприклад, можливість керувати синтезом матеріалів на нанорозмірному рівні вже зараз дає змогу створювати нові наноматеріали з поліпшеними властивостями. Новизна наноматеріалів виходить з того, що зі зменшенням розмірів структурних елементів вони набувають принципово нових властивостей. У віддаленій перспективі нанотехнології приречені на ще більш революційні досягнення з можливим впливом практично на всі галузі промисловості, включаючи енергетику, охорону здоров'я, оборону, транспорт і електроніку. Надаючи матеріалам та системам принципово нових якостей, нанотехнології забезпечують прогрес практично в усіх існуючих галузях техніки та промисловості. І це справді так, тому що нанотехнології керують структурою матерії на атомарному рівні, тобто на рівні, загальному для всього живого й неживого. Сьогодні вони є основою більшості інноваційних рішень у всіх сферах людської діяльності. Чи йдеться про генетику, клонування, бактерії або мікроорганізми, чи про нові матеріали для автомобілебудування, продукти і галузі металургії – скрізь і всюди інноваційні рішення так чи інакше пов'язані з нанотехнологіями. Ця інтегрувальна роль нанотехнологій висуває їх на одне з перших місць у сфері критичних технологій, без розвитку яких сьогодні жодна держава світу не може претендувати на конкурентний

технологічний розвиток і створення своєї інтелектуальної власності у сфері науки й технологій[8].

На жаль, сучасна система націлена на формування вузькоспеціалізованих «гвинтиків» застарілого механізму, а не на гармонійно розвинених людей, які самостійно мислять. Нерідко можна зустріти людину, що прекрасно розбирається, наприклад, у комп'ютерній техніці та програмуванні, але при цьому зовсім незнайома з досягненнями сучасної хімії, біології або навпаки.

Яскравим прикладом міждисциплінарного мислення, що досягло видатних результатів у різних галузях науки й мистецтва, був геній Леонардо да Вінчі. Його не можна називати лише вченим, лише художником, лише архітектором або лише інженером. Леонардо да Вінчі своїм прикладом показав можливість плідного поєднання різних знань і вмінь в одній людині, що б там не стверджували адепти «вузькоспеціалізованого підходу».

До речі, якщо говорити про зв'язок нанотехнологій з фундаментальними науками, то можна сказати, що практично будь-який предмет з тих, що вивчаються в школі, так чи інакше буде пов'язаний з технологіями майбутнього. Найочевидніше прогнозується зв'язок «нано» з фізикою, хімією та біологією. Очевидно, саме ці науки одержать найбільший поштовх до розвитку у зв'язку із нанотехнологічною революцією, що наближається. Але не тільки вони. Без розвитку інформаційних систем (особливо таких галузей інформатики, як штучний інтелект, комп'ютерне моделювання, робототехніка тощо), фундаментальною базою яких є математичний апарат, неможливі проєктування й створення пристроїв наноелектроніки.

2. Бізнес в галузі нанотехнологій

Досягнення в розробці та виготовленні наноструктур найбільшою мірою визначаються рівнем розвитку технологій, які дають змогу з атомною точністю отримувати наноструктури необхідної конфігурації та розмірності, а також методів комплексної діагностики властивостей наноструктур, включаючи контроль у процесі виготовлення (in situ) і управління на його основі технологічними процесами. За багатьма прогнозами, саме

[8] Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Основные направления фундаментальных и ориентированных исследований в области наноматериалов. *Успехи химии*. 2009. Т. 78, № 9. С. 867-888. https://doi.org/10.1070/RC2009v078n09ABEH004029

розвиток нанотехнологій визначить обличчя XXI століття, подібно до того, як відкриття атомної енергії, винахід лазера і транзистора визначили обличчя XX століття[9,10].

Сьогодні у вітчизняній наногалузі потрібно не працювати або робити кар'єру, а створювати бізнес. Якщо ви будете чекати поки хтось дасть вам робочі місця, то можете не дочекатися цього ніколи. Сьогодні наноіндустрії потрібні люди, які здатні не тільки на неймовірні відкриття, але й уміють виготовляти продукцію, а також реалізовувати її на ринках, долаючи всі можливі перешкоди. Що значить робити бізнес? Це означає придумати щось нове, потім це щось виготовити, а після цього продати. Так ось, придумати нелегко, зробити ще важче, але найважче – продати.

2.1. Інвестиції

Інвестиції – це насправді не що інше, як вкладення. Для розвитку будь-якого бізнесу потрібні вкладення: грошей, часу, здібностей – з метою їх подальшого примноження. Останнім часом усе більше далекоглядних підприємців, які розуміють перспективність та економічну вигоду нанотехнологій, вважають за краще вкладати кошти у високотехнологічні проєкти. Обсяг інвестицій у нанотехнології у США за різними оцінками становить на сьогодні від 50 до 60% від всіх світових інвестицій. На Україну ж припадає менше 0.5% світових «наноінвестицій». І цільова державна програма підтримки нанотехнологій взагалі тільки народжується.

2.2. Прибутковість і ризик

Необхідно зрозуміти і прийняти як належне одну просту істину: дохід від інвестицій можна отримати, лише прийнявши на себе певний ризик. У будь-якому бізнесі чим більший прибуток ви хочете отримати, тим на більший ризик вам доведеться йти. Є бізнеси стійкі, зі зрозумілими правилами гри, зрозумілими продуктами і зрозумілими ринками збуту. Для них заздалегідь відомі дані віддачі на вкладений капітал, і зазвичай вона невелика, оскільки добра прогнозованість цього бізнесу приваблює велику

---

[9] Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологии. Учебное пособие. Москва, «Бином. Лаборатория знаний», 2008. 431 с.

[10] Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. Москва, «Машиностроение-1», 2003. 112 с.

кількість конкурентів. До такого роду бізнесу належать, наприклад, автозаправні станції або продаж електроенергії. Тут можливі збитки в окремі несприятливі періоди, проте щодо загальної величини вкладеного капіталу вони невеликі.

З іншого боку, є ризиковані бізнеси, які пов'язані з розробкою і просуванням на ринки нових продуктів. Розробка їх вимагає часу та грошей, і тому заздалегідь передбачити, чи вийде розробити справді хороший продукт і чи буде він потім прийнятий споживачами, дуже складно. Ризик невдачі такого бізнесу дуже великий – аж до повної втрати інвестованого капіталу. Проте, якщо поталанить, можна виявитися першим і єдиним виробником гостро затребуваного продукту і за рахунок цього одержувати протягом певного часу дуже високі прибутки. Щоб наздогнати вас, конкурентам доведеться затратити чимало часу і ресурсів.

У бізнесі прибутковість і ризик йдуть пліч-о-пліч, існують одночасно. Ризик – це те, на що доводиться йти, якщо хочеш досягти поставленої мети, але багато хто виявляються до нього просто психологічно не готовим. Якщо інвестиції у банківські вклади мають передбачуваний результат, то про нанотехнологічні проєкти цього сказати не можна, оскільки життєві повороти практично непередбачувані. Будь-який підприємець підтвердить, що до 96% свого часу він витрачає на боротьбу з «ризиками», що виникли – різними неузгодженостями, збоями та неочікуваними ускладненнями. Тому, щоб вкладати гроші у непередбачуване, треба постаратися все непередбачуване прорахувати. За словами однієї мудрої людини, «той, хто не вчиться передбачати і запобігати ризикам, ризикує сам виявитися ризик-фактором, відлякує партнерів, інвесторів і, звичайно ж, гроші».

Кількість ризиків пропорційна кількості взаємозв'язків проєкту з навколишнім середовищем. Постачальники можуть продати погану сировину, партнери можуть підвести, покупцям може не сподобатися товар, податкова теж тут як тут ... Загалом, чим автономніший проєкт, тим він надійніший.

За різними даними, десять років тому в нашій країні частка успішних бізнес-проєктів серед усіх початківців складала 5–10%. Сьогодні цей показник становить менше 0,5%. Саме така ймовірність того, що час, сили і гроші, вкладені в проєкт, повернуться з прибутком. Отже, заняття бізнесом в Україні, особливо нанотехнологічним, не для людей зі слабкими нервами.

2.3. Конкуренція

Конкуренція – це конфліктне суперництво за досягнення кращих умов існування, функціонування та розвитку. Якщо сьогодні ваша продукція затребувана ринком, то не факт, що завтра хтось не зробить те ж саме, але дешевше і якісніше. Тому, щоб бути успішним у бізнесі, потрібно не тільки створити і вести його, а й безперервно розвивати свої конкурентні переваги:

– *науково-технічні переваги* (якість наукових досліджень, можливість розробки та виробництва нових товарів, ступінь оволодіння існуючими технологіями);

– *виробничі переваги* (низькі витрати на виробництво продукції, якість продукції, повнота використання можливого устаткування, вигідне місцезнаходження з точки зору транспортування, доступ до кваліфікованої робочої сили, висока продуктивність праці, можливості виробництва різної продукції, виконання замовлень споживачів);

– *торгові переваги* (широка мережа збуту, доступ покупців до товару, наявність власних магазинів, низькі витрати на продаж, швидка доставка);

– *маркетингові переваги* (висока кваліфікація співробітників відділу продажів, технічна підтримка, акуратне використання замовлень, різноманітність продукції, мистецтво продажів, привабливі дизайн і упаковка, гарантії);

– *професійні переваги* (особливий талант, ноу-хау, компетентність, уміння створювати ефективну рекламу, здатність швидко переводити товари зі стадії розробки в промислове виробництво);

– *організаційні переваги* (рівень інформаційних систем, здатність швидко реагувати на змінювані ситуації, досвід);

– *інші переваги* (сприятливий імідж і репутація, низькі витрати, вигідне розташування, приємні в спілкуванні та доброзичливі співробітники, доступ на фінансові ринки, правова захищеність) тощо.

Коли на ринку багато конкурентів, кожному з них дістається не так уже й багато прибутку, тому єдиний спосіб зробити бізнес надефективними – це позбутися конкуренції та стати монополістом. Маємо на увазі видатний винахід – те, чого ще ніхто, крім вас, не вміє робити. Поки що конкуренти розвідують, як це вам вдається, ви зможете зробити новий винахід, і вас уже не наздогнати. Білл Гейтс так і зробив – він просто винайшов DOS в той час, коли ніхто про це не

замислювався. А коли успіх DOS привабив безліч конкурентів, він винайшов Windows і став найбагатшою людиною в світі.

Не забувайте про те, що поки ви керуєте своїм бізнесом, ваші конкурентні переваги – винаходи, спроможності, талант – працюють на вас. Як тільки ви продали їх чужій компанії, ви стаєте найманим працівником – пролетарем. Коли вони розберуться у вашому винаході, ви станете їм не потрібні і втратите свої переваги. Такий закон природного відбору.

2.4. Інформація

Доходи від інвестицій прямо пропорційні якості інформації, якою ви володієте. Недарма Білл Гейтс сказав, що в новому світі успіху досягне той, хто навчиться правильно поводитися з інформацією, а вже він на цій справі розуміється як ніхто інший. Якщо ви знаєте, акції якої компанії виростуть у ціні, а які впадуть, ви можете миттєво заробляти купу грошей, однак, щоб отримати таку інформацію, потрібно досконально знати все, що діється в кожній компанії. Як отримати бажану інформацію, щоб вигідно інвестувати свої гроші і час? Основою дорогоцінного знання є розвідка. Розвідка та ще раз розвідка – зрозуміло, у рамках закону. Наноіндустрія має таку кількість взаємозв'язків, що досить просто відкрити очі і «нагострити вуха», щоб дізнатися про все необхідне, і навіть понад те при цьому інформація може потрапити до вас у руки різними шляхами:

– моніторинг ЗМІ, що належать до потрібної галузі;
– шляхом розвитку контактів з експертами та аналітиками;
– через співробітництво з колегами та інвесторами;
– за допомогою вивчення зразків продукції конкурентів;
– за допомогою оперативної роботи та з інших джерел.

2.5. Економіка

Беручи до уваги все вищесказане, сформулюємо основні принципи майбутньої наноекономіки:

– *великий обсяг знань дозволяє створювати ефективніші машини.* Чим більше ви знаєте, тим кращі продукти ви можете створити. До винаходу двигуна внутрішнього згоряння не було літаків, а до відкриття тунельного ефекту не могло відбутися дослідження вірусу тютюнової мозаїки (ВТМ).

– *створення ефективніших інструментів відкриває можливість створення ще ефективніших інструментів у більшій кількості.*

В біологічній еволюції поява ДНК дозволила «експериментувати» з білковими структурами набагато швидше й ефективніше. Також як винахід комп'ютерів і засобів комп'ютерного моделювання (CAD) дозволило багаторазово прискорити і спростити розробку нових машин.

– *чим швидші комп'ютери і чим їх більше, тим швидше робляться відкриття і розробляються ефективніші машини.* Згадаймо історію з розшифровкою генома людини або програми наномоделювання, можливості яких прямо залежать від продуктивності комп'ютерів.

– *автоматизація та роботизація дозволяє виробляти ефективніші продукти швидше, дешевше і в більшій кількості.* Уявімо собі ручне виробництво сотень мільйонів компакт-дисків або хоча б однієї нанотрубки.

Таким чином, кожна конкурентна перевага допомагає в розвитку всіх інших конкурентних переваг і, навпаки, кожна слабкість відбивається на інших сторонах бізнесу. У результаті розриву між державами, компаніями і людьми, що розвиваються з різною швидкістю, зросте більше, ніж сьогодні, розрив між людьми та тваринами. *Отже, ера нанотехнологій показує, хто на що здатний. Діючи швидко та з розумом, в ній можна заробити мільярди, а лінуючись і безтурботно попиваючи пиво, водночас стати неандертальцем.*

2.6. Проєктування бізнесу

Зростання популярності нанотехнологій серед населення в поєднанні зі споконвічним прагненням до «халяви» привертає багато неграмотних і просто нечесних людей. Нанотехнології здаються їм такою собі скатертиною-самобранкою, за допомогою якої можна збагатитися за ніч. Інвестори вже по вуха закидані нісенітницею типу «вічних двигунів, що черпають енергію з наносвіту» й «оздоровчих брелоків магнітних і нанотехнологій». Так нехай же ваш проєкт буде для них ковтком свіжого повітря.

2.7. Оцінка технології

Спочатку важливо правильно оцінити винахід, який ви хочете зробити основою майбутнього бізнесу. Це найважливіший крок – від нього залежить успішність усього проєкту. Справді вартісний винахід – це те, що збільшує корисний ефект продукту в десятки й сотні разів без істотного погіршення інших показників. Через

швидкоплинність технологічних змін у галузі на найвитонченіший винахід може швидко знайтися вдосконалений замінник, а то й зовсім виявиться непотрібним у результаті розвитку конкурентів. Тому непогано мати уявлення про інформацію і планування чужих розробок, активістів конкурентів, наукові статті тощо. Для цього суть винаходу розбивається на маленькі компоненти. Серед них виділяються ключові, складові «ноу-хау» і вони повинні бути безумовно новими, унікальними і через ті чи інші причини важкодосяжними для конкурентів.

В Україні через низький рівень розвитку законодавчого регулювання відносин у сфері інтелектуальної власності новинка часто належним чином не оформлюється, але від цього нікуди не зникає, а продовжує бути присутньою в тому чи іншому вигляді та зберігає свою цінність для підприємства, а також для конкурентів, які постараються її роздобути. Тут ефект українського патентування, не підкріпленого міжнародним, швидше негативний, оскільки змушує заявника розкрити багато деталей технології. У результаті вітчизняний розробник найчастіше дізнається про повний економічний потенціал своєї технології вже у вигляді продукту конкурента на прилавку.

Одне з рішень цієї проблеми запропонував ще 500 років тому геніальний вчений Леонардо да Вінчі. Ситуація із захистом інтелектуальної власності в середньовічній Італії була приблизно такою самою, як у сучасній Україні, тож, побоюючись, що проєкти машин будуть вкрадені й реалізовані без його відома – тобто без сплати гонорару, – винахідник навмисно вносив у свої креслення невеликі помилки. Наприклад, уже тоді він розробив проєкт «танка» – трохи схожу на черепаху машину. Але якщо побудувати її з використанням вихідних креслень, вона не зможе рухатися: шестерінки будуть просто блокувати одна одну. Сучасні інженери, які заради цікавості будують моделі за проєктами Леонардо, без особливих зусиль знаходять помилку у кресленнях да Вінчі, й машина справді рухається. Але це легко зробити за сучасного розвитку науки, а для техніків часів Відродження такий захист був непосильним завданням.

2.8. Оцінка ринку

Зазвичай самі творці інновації не до кінця уявляють собі властивості отриманого продукту внаслідок нестачі часу і грошей на детальні дослідження. Тому необхідне дослідження самого

отриманого продукту, оскільки без знання властивостей новинки (найчастіше досить неочікуваних) ризик здійснення маркетингової помилки близький до 100%. Це нормально й допоможе згодом грамотно організувати постійне вдосконалення продукту відповідно до потреб клієнтів. Чим більше унікальних, корисних і чудових властивостей ви відкриєте і вивчите в продукті, тим ширшим буде його ринок і менше надійде скарг. Важливою особливістю нанотехнології як галузі є її багатогранність та безліч несподіваних напрямів застосування продуктів і технологій. Тому наявність хоча б декількох партнерських нанотехнологічних виробництв під час системного аналізу потенційних програм їх розробок дозволяє досягти чималої економії за рахунок синергетичного ефекту. Синергетичний (системний) ефект – це збільшення сумарної ефективності двох процесів під час їх спільної роботи.

Ніхто не стане купувати товари тільки тому, що вони «нано», скоріше навпаки: почувши це, клієнт згадає будь-яку статтю про шкоду фулеренів для мишей, а «нанотехнологічність» продукції зацікавить хіба що митника, але ж це не той інтерес, якого ви хочете. Ви повинні пам’ятати, що чим натхненніше ви ставитесь до проєкту, тим більша ймовірність наявності в ньому помилок, ризиків, протиріч, на які не звернули уваги. *Найретельніше слід перевіряти правильність суджень, які здаються нам очевидними.*

Щоб продукт приніс прибуток, він повинен мати високий попит, тобто бути клієнторієнтованим. У діалозі з потенційним споживачем переконайтеся, що пропонуєте рішення його проблем, а не просто технологічну «заморочку».

Насправді існують два види нанопродукції. Одні продукти являють собою вдосконалення звичайних товарів – довговічніші м’ячі, легші і міцніші ракетки, незатуплювані ножі та свердла, надпотужні батарейки, компактніші дисплеї тощо. Вони мають стійкі ринки, і ви завжди знаєте, хто буде покупцем і як просувати продукцію. З іншого боку, тут вам протидіють величезні конкуренти, що працюють у цій галузі десятиліттями (а деякі – навіть століттями).

Інші – не мають аналогів на ринку. Самоочисні покриття, нанотрубки, антибактеріальні наночастинки і сканувальні мікроскопи мало схожі на все, що було раніше, і тому, з одного боку, не завжди зрозуміло, кому і як їх запропонувати, а з іншого – ви самі створюєте новий ринок, на якому поки що нікого немає

(якщо, звичайно, ви дієте досить швидко і охороняєте секрети своєї новинки).

2.9. Розробка проєкту

Вивчивши всі аспекти майбутнього бізнесу, постарайтеся оцінити спектр можливих сценаріїв розвитку подій і, відповідно, розподіл імовірності доходів і ризиків. Після цього починається найбільш творча частина – розробка проєктної стратегії. А точніше, системи стратегій, варіанти яких обмежені лише вашою винахідливістю і діловою етикою. Це може бути як просте кредитування, так і складна система операцій зі злиття, поглинання, передачі технологій, створення спільних підприємств тощо. Кожна стратегія має систему сценаріїв, за якими можуть розвиватися події (якщо якийсь параметр контролюєте ви, то його варіації породжують різні стратегії, якщо його контролюють сили, вам не підвладні, то його варіації породжують різні сценарії). Суть завдання в тому, щоб на кожен сценарій, яким повернеться до вас доля, ви мали свою ефективну стратегію. Зрозуміло, різні стратегії і сценарії виявляються хитрим чином переплетеними. Планування нанобізнесу – справа непроста.

2.10. Здійснення проєкту

Після того, як інвестиційне рішення прийнято, інвестор найімовірніше доручить вам виконання розробленої вами стратегії. При цьому активність вашого управління проєктом може варіюватися від тихого спостереження до будівництва наукограду, зміни місцевої адміністрації та колової оборони до спроб західних і східних конкурентів прикрити ваш проєкт. Однак цьому неможливо навчити лише за книгами, як і плаванню або бойовому мистецтву. Можна лише розпочати й навчитися самому.

Як бачимо, нанотехнології в Україні, всупереч усьому, все-таки набирають ходу. Їх розвиток дасть нашій країні єдиний шанс повернутися в число світових лідерів у науковій, економічній і політичній сферах, а також вирішити багато економічних, територіальних і демографічних проблем.

ВИСНОВКИ

Провідними країнами світу визначено інноваційний потенціал нанотехнологій і створено відповідні національні програми. Відставання України в цій галузі має не технологічний,

а інтелектуальний характер. Насамперед необхідно розвивати освіту в цій галузі, підвищувати рівень підготовки інженерних кадрів.

Основними тематиками сучасних програм і курсів з нанотехнологій є такі: основні величини і масштаби в наногалузі; технологія виробництва і експериментального дослідження; елементи квантової механіки і статистичної фізики; тунелювання; одноелектронний транзистор; напівпровідникові наноструктури на поверхні; елементи теорії провідності в нанопристроях; одновимірні провідники; квантування опору, квантовий точковий контакт; вуглецеві нанотрубки; елементи квантової теорії інформації і квантові комп'ютери; біонаноелектроніка.

Дослідження в нанорозмірній галузі ведуться практично в усіх фундаментальних науках, а точніше – на стику наук. Усі важливі нанопроєкти мають міжгалузевий характер і вимагають нових організаційних підходів для їх реалізації та відповідної підготовки кадрів.

Основними складниками науки про наноматеріали й нанотехнології є: фундаментальні дослідження властивостей матеріалів на наномасштабному рівні; розвиток нанотехнологій як для цілеспрямованого створення наноматеріалів, так і для пошуку та використання природних об'єктів з наноструктурними елементами; створення готових виробів із використанням наноматеріалів та інтеграція наноматеріалів і нанотехнологій у різні галузі промисловості та науки; розвиток засобів і методів дослідження структури та властивостей наноматеріалів, а також методів контролю й атестації виробів і напівфабрикатів для нанотехнологій. Досягнення в розробці та виготовленні наноструктур найбільшою мірою визначаються рівнем розвитку технологій, які дають змогу з атомною точністю отримувати наноструктури необхідної конфігурації та розмірності, а також методів комплексної діагностики властивостей наноструктур.

Підкреслено важливість економічних питань у розвитку галузі нанотехнологій, а саме: розгортання бізнесу, інвестування, співвідношення прибутковості та ризику, визначення конкурентного середовища. Підкреслено, що доходи від інвестицій прямо пропорційні якості інформації. Сформульовано основні принципи майбутньої наноекономіки. Показано можливість попередньої оцінки технології та ринку її споживачів. Надано рекомендації щодо розробки та реалізації проектів у галузі нанотехнологій.

АНОТАЦІЯ

Досліджено шляхи розвитку нанотехнології та підготовки сучасного інженера в світлі реалізації принципів і завдань Болонського процесу. Запропонована програма курсу нанотехнологій для студентів інженерних спеціальностей. Виокремлено основні складники науки про наноматеріали й нанотехнології. Розглянуто проблеми формування бізнесу, інвестицій, прибутковості та ризику, конкуренції, інформації, економіки, проектування бізнесу, оцінки технологій в галузі виробництва наноматеріалів. Зроблено оцінку ринку нанотехнологій. Надано рекомендації щодо розробки та реалізації проектів у цій галузі. Розглянуто використання нанотехнологій і наноматеріалів як один із визначальних чинників наукового, економічного й оборонного розвитку держав.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фейнман Р.Ф. Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир физики. *Российский химический журнал*. 2002. Т. 46, № 5. С. 4–6.

2. Бучаченко А.Л. Нанохимия – прямой путь к высоким технологиям нового века. *Успехи химиш*. 2003. Т. 72, № 5. С. 419–437. URL: https://doi.org/10.1070/RC2003v072n05ABEH000795.

3. Таланчук П., Малишев В. Становлення й розвиток нанотехнологій у світі і в Україні: використання інтелектуального капіталу, тенденції розвитку. *Університет «Україна»*. 2009. № 10–11. С. 3–4.

4. Таланчук П., Малишев В., Липова Л. Освіта XXI століття. Самовизначення особистості в контексті інтеграції України до Європейського інтелектуального простору. *Освіта регіону. Політологія, психологія, комунікації*. 2009. № 3. С. 206–213.

5. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех. *Nanotechnology News Network*, 2005. 444 с.

6. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. *Наноструктурные материалы*. Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Москва, Academia, 2005. 192 с.

7. Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Кротов. А.М. *Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологи получения*. Москва, Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 2007. 125 с.

8. Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А. Основные направления фундаментальных и ориентированных исследований в области наноматериалов. *Успехи химии*. 2009. Т. 78, № 9. С. 867–888. URL: https://doi.org/10.1070/RC2009v078n09ABEH004029.

9. Старостин В.В. Материалы и методы нанотехнологии. Учебное пособие. Москва, «Бином. Лаборатория знаний», 2008. 431 с.

10. Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. Москва, «Машиностроение-1», 2003. 112 с.

Information about authors:
Malyshev V. V.,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Director of Institute of Engineering & Technology
Open International University of Human Development "Ukraine"
23, Lvivska St., Kyiv, 03115, Ukraine

Gab A. I.,
Ph.D., Associated Professor,
Associated Professor of the Department
of Modern Engineering and Nanotechnologies
Open International University of Human Development "Ukraine"
23, Lvivska St., Kyiv, 03115, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.11

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА В КОНТЕКСТІ НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ

Малишев В. В., Шахнін Д. Б.

ВСТУП

Серйозним спонукальним та об'єднувальним моментом у боротьбі за збереження довкілля є так звані «зелені» рухи та «зелені» технології[1,2]. Початок «зеленому» руху було покладено ще в 60-і роки XX століття, коли громадськість Північної Америки та Західної Європи, яка виступає за збереження навколишнього середовища, домоглася посилення природоохоронного законодавства й контролю за використанням токсичних хімікатів у різних галузях економіки та соціальної сфери. Окрім штрафних санкцій і заборони застосування ряду особливо небезпечних хімікатів, посилилась увага до пошуку менш токсичних заміщувальних хімічних речовин, альтернативних технологій енерго- та ресурсозбереження. Більше того, законодавчо був уведений токсикологічний контроль отриманих і застосовуваних хімічних речовин та матеріалів.

Визначення «зеленої» хімії, прийняте ІЮПАК, таке: «Зелена хімія – відкриття, розробка й використання хімічних продуктів та процесів, які зменшують або виключають використання й утворення шкідливих речовин». Визначення прямо вказує на необхідність урахування можливих негативних явищ ще на стадії створення нових сполук, про що раніше дослідники часто не замислювалися. Поль Анастас та Джон Корнер сформулювали 12 принципів

---

[1] Тарасова Н.П., Нефедов О.М., Лунин В.В. Химические проблемы устойчивого развития и сохранения окружающей среды. *Успехи химии*. 2010. Т. 79, № 6. С. 491–492. URL : https://doi.org/10.1070/RC2010v079n06ABEH004149.

[2] Лукашенко Т.Ф., Малишев В.В. *Екологічна хімія*. Навчальний посібник до спецкурсу «Екологічна хімія» для студентів напрямів підготовки «Хімічна технологія та інженерія», «Екологія», «Біологія». Київ : Університет «Україна», 2012. 269 с.

«зеленої» хімії, які стали нині класичними[3]. Ці принципи, які розкривають практичні аспекти визначення ІЮПАК, є такими:

– запобігання утворенню відходів;

– раціональне (ефективне) використання вихідних реагентів;

– зниження загроз процесів і продуктів синтезу;

– конструювання «зелених» матеріалів;

– виключення використання небезпечних допоміжних реагентів;

– енергозбереження в хімічних процесах;

– використання відновлюваної сировини;

– зменшення числа проміжних стадій технологічних процесів;

– використання каталізаторів для прискорення хімічних процесів;

– біорозкладання для отримання сполук, безпечних для наволишнього середовища;

– забезпечення аналітичного контролю в реальному часі;

– попередження можливості техногенних аварій.

1. Предмет дослідження екологічної науки, екологічна ситуація сьогодення та екологічна освіта

Термін «екологія» став останнім часом «усепроникним» і «всеосяжним». Будь-яка наука сьогодні без видимих зусиль установлює свою предметну галузь екологічних досліджень. Такий феноменальний злет екологічного напряму небезпідставний і потребує уточнень.

Термін *екологія* вперше вжив у 1866 році німецький учений Е. Геккель. Він походить від грецьких слів *oikos*, що означає дім, помешкання, місце перебування та *logos* – наука. Так Геккель назвав науку, що вивчає організацію та функціонування надорганізмових систем різних рівнів: видів, популяцій, біоценозів та біосфери. Спочатку цей термін використовувався тоді, коли йшлося про вивчення взаємозв’язків між рослинними та живими спільнотами, що входять до складу стійких та організованих систем, які склалися у процесі еволюції органічного світу з навколишнім середовищем.

Насправді, предметом дослідження екології є детальне вивчення за допомогою кількісних методів основ структури та функціонування природних та створених людиною систем. Жива

[3] Anastas P., Eghbali N. Green Chemistry: Principles and Practice *Chem. Soc. Rev*. 2010. V. 39. P. 301–312. URL : https://doi.org/10.1039/B918763B.

природа, що оточує нас, – це не безладне, випадкове поєднання живих істот. Вона є стійкою організованою системою органічного світу, що склалася в процесі його еволюції. Центральне місце в екології посідає проблема динаміки й чисельності популяції і механізмів її регулювання. Тут виявляється значимість участі популяційних (конкуренція за їжу) та біоценотичних (хижаків, паразитів, збудників захворювання) механізмів.

Серед основних завдань екології можна виділити такі:

– дослідження особливостей організації життя, в тому числі у зв'язку з антропогенним, що є результатом людської діяльності, впливом на природні системи;

– створення наукової основи раціональної експлуатації біологічних ресурсів;

– прогнозування змін природи під впливом діяльності людини;

– збереження середовища існування людини.

Збалансованість взаємовідносин людини з видами, популяціями та спільнотами може бути досягнута за рахунок комплексних зусиль із боку людини шляхом екологічної регламентації господарської діяльності, цілеспрямованого, екологічно виправданого впливу на види, популяції та екосистеми, шляхом екологічного виховання підростаючих поколінь.

Завдяки цьому може бути розв'язано багато проблем господарської діяльності суспільства:

1) інтенсифікація виробництв ряду галузей;

2) збереження та заощадження сировини;

3) охорона історичних та архітектурних пам'яток;

4) збільшення часу експлуатації промислових та житлових комплексів;

5) збільшення тривалості життя та зниження захворюваності людей в умовах урбанізованого середовища;

6) вдосконалення механізмів взаємодії суспільства та природи.

Характерною рисою екології є те, що вона не належить до числа наукових дисциплін із простою лінійною структурою, оскільки вона є міждисциплінарною. У процесі свого розвитку та освоєння людиною нових дисциплін екологічні знання повинні неперервно накопичуватися. Екологія є спільною базою співпраці фахівців усіх напрямків: натуралістів та інженерів, експериментаторів та вчених-теоретиків, біологів, математиків, економістів, медиків, метеорологів, для яких екологічні знання є просто необхідними.

Набуття кожною людиною екологічних знань буде сприяти дбайливому ставленню до природи, збереженню її та меншій кількості ударів з її боку у відповідь за бездумне ставлення до неї. Усе більше людей бере участь у діяльності з охорони навколишнього середовища, а екологія стає все важливішою для життя людини і її існування на планеті. Думати глобально, а діяти локально – ось актуальний екологічний девіз сьогодення[4].

Сучасний стан навколишнього природного середовища переконливо свідчить, що факти, які детермінують загострення екологічної ситуації, об'єктивно діють у будь-якому індустріальному суспільстві незалежно від соціально-економічного ладу, але значно корелюючись (посилюючись або послаблюючись) чинниками техніко-технологічного, а головне – економічного та соціокультурного порядку, рівнем розвитку демократії у сфері політики та господарства, можливостями впливу громадян на центри й процеси прийняття рішень тощо.

Наш час – це період тотальної екологічної освіти, коли основи екологічних знань викладають усім, починаючи з дитячого віку – в школах та інститутах, на різних семінарах і курсах, по радіо й телебаченню – та закінчуючи підвищенням рівня екологічної освіти керівників усіх рангів у всіх країнах, на всіх континентах. У більшості країн світу екологія стала обов'язковою дисципліною в усіх школах і вищих закладах освіти, в багатьох вищих навчальних закладах створено кафедри або факультети екологічного профілю, проведено сотні екологічних національних і міжнародних семінарів, конференцій, з'їздів. Велику еколого-просвітницьку роботу проводять у всьому світі організації «зелених», товариства з охорони природи, серед них такі відомі, як «Грінпіс», «Легамбіенте» тощо. Ці важливі для цивілізації процеси екологізації свідомості населення, формування нового – екологічного світогляду, нової – екологічної культури цілком характерні і для України.

За останні 5 років у нашій державі також розроблено програми й концепції розвитку екологічної освіти й виховання, видано посібники й підручники з екології, створено десятки кафедр і факультетів екологічного профілю в інститутах та університетах, започаткувалося багато журналів загальноекономічного, еколого-

[4] Лукашенко Т.Ф., Малышев В.В. Формирование экологической компетентности – важная составляющая экологического образования. *Экологическая химия*. 2012. Т. 21. № 4. С. 252–256.

економічного, еколого-географічного змісту («Ойкумена», «Світ у долонях», «Пролісок», «Паросток», «Рідна природа» тощо).

Ще в 1975 р. учасники Міжнародного семінару з екологічної освіти (Белград, Югославія) запропонували глобальну схему екологічної освіти. Відповідно до цієї схеми головною метою екологічної освіти має бути формування в населення планети усвідомлення того, що довкіллям необхідно опікуватися й що для цього треба мати відповідні знання, досвід, уміння, мотивації та зобов'язання як для індивідуальної, так і для колективної роботи задля порятунку біосфери та запобігання майбутнім екологічним катастрофам.

Сьогодні активно розвиваються як формальна екологічна освіта (у школах, вищих навчальних закладах, інститутах підвищення кваліфікації), так і неформальна (за допомогою засобів масової інформації, кіно, музеїв, виставок, заходів природоохоронних товариств тощо).

Концепція освіти в Україні повинна враховувати безпрецедентну інтегративність екології, її орієнтацію на вивчення сфери безпосередніх життєвих інтересів людини. Від формування цих знань залежить певний рівень ставлення людини до навколишнього середовища, тобто не лише знання і розуміння, але й виховання. Від цих знань залежить саме існування людства і всієї планети Земля.

Підвищення культури громадян України у спілкуванні із природою, екологічна підготовка кадрів в умовах складного перехідного періоду мають важливе державне значення, оскільки покликані допомогти у вирішенні життєво важливих соціально-економічних, еколого-економічних і геополітичних проблем.

В останнє десятиліття в системі екологічних наук з'явились нові наукові і навчальні дисципліни: екологія міст, екологія особистості, екологія дитини тощо. Заявила про себе і визначена як одна з важливих складових частин системи екологічних дисциплін соціальна екологія. З огляду на це є необхідність розширити і по-новому сформулювати предмет дослідження та вивчення загальної і соціальної екології.

Аналіз тенденцій глобальних, регіональних і локальних змін у природних екосистемах та біосфері загалом свідчить про нагальну потребу формування у студентів економічних спеціальностей із метою набуття ґрунтовних екологічних знань та культури спілкування із природою необхідних навичок раціонального

природокористування, екологізації практично всіх навчальних дисциплін.

Тому навчальний курс «Основи екології» займає сьогодні належне місце серед найголовніших та фундаментальних дисциплін. Навчальна програма з курсу, що рекомендована МОН, розроблена з урахуванням сучасних вимог до рівня екологічних знань, наявності базових екологічних знань, отриманих у школі, світового й вітчизняного досвіду.

Обсяг екологічного матеріалу, отриманого студентами внаслідок успішного засвоєння курсу «Основи екології», повинен забезпечити розуміння екологічної аксіоматики, сформувати в кожного з них особисте ставлення до екологічних проблем світу, рідного краю, а також галузі майбутньої діяльності, що особливо важливо в межах нашого дослідження, допомогти враховувати екологічні вимоги і стандарти під час вирішення інженерних та інших завдань, забезпечити запас фундаментальних знань і концептуальних основ сучасної екології, достатній для подальшого поглиблення й удосконалення екологічної освіти, спрямованої на екологічно безпечну життєдіяльність.

Курс «Основи екології» включає інформацію про фундаментальні теоретичні, глобальні екологічні і ресурсно-галузеві екологічні проблеми, стратегію, тактику і методи їх розв’язання локального, національного і глобального рівнів. Зміст курсу «Основи екології» побудовано на основі сучасних уявлень про сутність, структуру, цілі й завдання екології, її значення в житті суспільства, місце і зв’язок з іншими науками. Система отриманих на цій основі знань має забезпечити формування чітких і обґрунтованих уявлень про взаємодію і взаємозв’язок усіх компонентів у природничій, соціальній і технологічній сферах, про стратегію і тактику збереження й стабільного розвитку життя на Землі.

На нашу думку, у зв’язку з викладеним очевидною є необхідність змін у структурі екологічної освіти, оновлення її змісту, реалізованого в системі традиційних і нових наукових понять, дидактично і методично пов’язаних із різними освітніми і освітньо-професійними рівнями; потрібне оновлення технологій навчання екології, спрямованих на реалізацію програм неперервної освіти, навчальних планів дисциплін різних рівнів засвоєння.

2. Структура та зміст екологічної освіти у вищих навчальних закладах України. Її методологічна основа та принципи

Останнім часом істотно посилився вплив людини на природу. За останні 40-50 років людство встигло пройти більшу частину шляху, який відділяє планету від екологічної катастрофи. Шкідливі виробничі і побутові відходи стали суттєво перекривати можливості біосфери щодо їх природної переробки й нейтралізації. Вони стали нагромаджуватися в атмосфері, воді, ґрунті й виявляти руйнівну дію на природні цикли, що складалися мільйони років. Дедалі більше посилюється нестача сировинних ресурсів, може настати загроза нестачі кисню й питної води.

Ураховуючи значимість екологічної освіти, слід визначити її природу й завдання. З огляду на те, що захист і поліпшення середовища потребують включення в цю діяльність широких мас населення різного віку, рівня освіти і різної професійної орієнтації, екологічна освіта повинна бути пристосована до всіх цих категорій населення, розвивати в них розуміння необхідності підтримувати екологічну рівновагу в середовищі, що оточує людину, і запобігати небезпеці, яка може загрожувати людині в разі її порушення.

Існують різноманітні трактування екологічної освіти. Наприклад, думка, що слід дати знання й розвинути здатність оцінювати становище та бачити комплексні проблеми стосовно середовища. Також є думка, що екологічна освіта повинна вносити вклад у формування конструктивного підходу до середовища – як у філософському, так і в прагматичному плані. Є розуміння того, що екологічна освіта повинна займатися ставленням людини до її природного та штучного середовища, має охоплювати проблеми населення, забруднення, використання ресурсів, збереження природи. Можна сказати, що в різних визначеннях присутня одна і та сама думка: екологічна освіта – це освіта із глобальних умов існування людства і стратегії збереження цих умов при постійному поліпшенні якості життя. Метою екологічної освіти є розвиток уявлень про основні характеристики середовища, що оточують людину, відношення в ній і до неї, на основі чого людина прагне до збереження й поліпшення середовища.

По суті, екологічна освіта в рамках навчання має зробити внесок у новий підхід у ставленні людини до свого середовища – як єдності природного і штучного, пов’язуючи знання природничих і суспільних наук про середовище як єдиний і необхідний життєвий простір людини, який можна зберегти і при постійному розвитку

науки і техніки. Однак екологічна освіта може робити внесок не лише у стратегію існування, а й у поліпшення якості життя в конкретних середовищах.

Методологічною основою екологічної освіти слід вважати такі положення:

1. Світ матеріальний являє собою складну систему зв'язків і взаємовідносин, тобто зміни його елементів взаємозумовлені.

2. Захист природи являє собою застосування закону відносин і взаємних дій, що існують у матеріальному світі.

3. Людина і суспільство – наслідок еволюції живої природи (суспільство і природа становлять неподільне суперечливе ціле).

4. Зміни в біосфері, шкідливі для людини і суспільства, зумовлені відсутністю або недостатністю заходів у регулюванні взаємодії суспільства і природи.

5. Існує вплив природи на темпи розвитку суспільства, але відсутній вплив природи на характер суспільних відносин[5].

Виходячи із цього, екологічна освіта намагається відповісти на запитання:

— які наслідки зрослої інтенсифікації в обміні матерією і енергією між природою і суспільством;

— які найважливіші зміни в системі взаємовідносин у біосфері;

— які наслідки має введення до біосфери великої кількості нових речовин і елементів;

— які суспільні детермінанти ставлення суспільства до природи і чи повинен захист природи відбуватися через гальмування технічного прогресу;

— в чому суть відповідальності людини за стан навколишнього середовища?

Екологічна освіта має за мету формування екологічної свідомості, вона робить внесок у розвиток уявлення про те, що порушення екологічної рівноваги необов'язково супроводжує діяльнісне ставлення до природи, але виникає в рамках певних соціально-економічних відносин. Екологічна освіта повинна робити внесок у розуміння того, що збереження середовища людини стає важливою категорією в системі цінностей суспільства і воно

[5] *Проблеми освіти*. Наук.-метод. зб. Київ : ІЗМН, 1998. Вип. 14. 232 с.

повинно стати предметом етичного ставлення людей до їх природного і суспільного середовища.

Такі цілі екологічної освіти зумовлюють її присутність не лише на всіх сходинках системи освіти, а й у додатковій, неперервній освіті. У галузі вищої освіти не існує концептуально і змістовно побудованої системи екологічної освіти й виховання, яка відповідала б вимогам суспільства, за винятком окремих предметів у навчальних планах ВНЗ, в яких має бути проблематика захисту середовища. У навчальних програмах з інших предметів екологічні проблеми якщо і присутні, то викладені фрагментарно і в невеликому обсязі.

Курс «Основи екології» є складовою частиною навчальних планів усіх напрямів підготовки спеціалістів із вищою освітою і входить до блоку дисциплін природничо-наукової підготовки. Курс включає інформацію про фундаментальні теоретичні, глобальні екологічні і ресурсно-галузеві екологічні проблеми, стратегію, тактику і методи їх вирішення локального, національного і глобального рівнів.

Із другої половини 70-х років екологічна освіта в Україні стає обов'язковою. Спочатку існував спорадичний факультатив, присвячений охороні природи. Після Тбіліської конференції під егідою ООН (1988) викладання набуває певної системності. За розмовами про важливість екологічної освіти лишилося непоміченим справді основне і принципове: змінилася парадигма екологічної освіти. Спочатку метою було формування психологічної настанови на раціональне природокористування, охорону природи взагалі. Тепер ставиться завдання формувати екологічну свідомість, культуру, мораль, етику. Тобто прагматику заступили світоглядні цінності.

Сьогодні існують різні тенденції екологічної освіти стосовно пріоритету формування тих або інших підструктур екологічної свідомості. Відповідно до стратегічних орієнтацій в екологічній освіті існують три основні підходи до проблеми змісту екологічної освіти[6]. Перший підхід пов'язаний із формуванням екологічних уявлень. Для студентів вищої школи сьогодні практично не існує концептуальної та змістовно побудованої системи екологічної освіти, за винятком хіба що окремих предметів. Другий підхід – формування ставлення до природи. Обираються така екологічна

[6] Корсак К.В., Плахотнік О.В. Основи екології : навч. посібн. 3-е вид., перероб. і доп. Київ : МАУП, 2002. 296 с.

інформація і такі види діяльності, які передбачають взаємини суб'єкта із природою. Третій підхід пов'язаний із формуванням технологій взаємодії із природою.

Екологічна освіта із середини 80-х років невпинно входить в освітню практику, однак без жодного позитивного ефекту. Основна причина в тому, що екологічна освіта 80-х років орієнтована на гербартську педагогіку, що діє за принципом виховального навчання. Вихованці накопичують екологічну інформацію, екологічні знання, але екологічна культура при цьому не формується. Як наслідок маємо екологічно обізнану й екологічно невиховану особистість, яка, володіючи екологічними знаннями, проявляє актив екологічного вандалізму. Тому невідкладним є розроблення стратегії екологічного виховання, оскільки вважається, що здійснюється воно автоматично – разом з екологічним навчанням. Ясна річ, процеси навчання й виховання тісно пов'язані між собою, хоча екологічне навчання – це власне складова частина природничо-наукової освіти, а екологічне виховання має ціннісний аспект, адже передусім ідеться про формування психоемоційної сфери студента.

Для правильної організації екологічної освіти й виховання у вищих навчальних закладах, підвищення її ефективності слід керуватися такими принципами:

– першочергове завдання екологічної освіти – формування наукових уявлень про біосферу як унікальну оболонку Землі, де існує життя, – екологічна освіта повинна пов'язувати засвоєння наукових уявлень про біосферу з розвитком діалектично суперечливої єдності «біосфера – людство»;

– екологічні проблеми тісно пов'язані з демографічними, енергетичними, продовольчими й сировинними проблемами. Екологічна освіта перебуває на стику наук про природу і про людину. Тому під час розроблення питань про зміст та форми роботи, методи і методики екологічного виховання виходять із того, що воно є одним із найважливіших напрямів забезпечення синтезу природних і соціальних наук у процесі навчання, виховання і освіти;

– екологічна освіта має формувати наукові уявлення про соціальне коріння глобальних екологічних проблем. Проблеми взаємозв'язку природи і суспільства тісно переплітаються з широким колом етичних і естетичних питань;

– навколишнє середовище, природне і створене людством, має розглядатись як єдине ціле, підходити до його оцінки і характеристик слід з екологічних, економічних, соціальних, законодавчих, культурних і естетичних позицій;

– цілі, які стосуються розуміння та вирішення проблем, пов'язаних із навколишнім середовищем, мають бути чітко виокремлені з-поміж цілей освіти на всіх рівнях і всіх секторах;

– має бути узгоджений той вклад, який різні галузі науки повинні внести в розуміння навколишнього середовища і в розв'язання його проблем, роблячи при цьому особливий акцент на розвитку відносин, які дозволяють приймати спосіб життя і моделі розвитку, що не справляють негативного впливу на якість навколишнього середовища;

– екологічна освіта та виховання повинні бути безперервними і являти собою підсистему в системі вищої освіти;

– необхідно дотримуватися міждисциплінарного підходу, тобто розглядати екологічні питання не як окремі дисципліни, а, насамперед, як принцип, за якого всі дисципліни навчального плану пронизані ідеями збереження довкілля. Це дає змогу отримати цілісне уявлення про навколишнє середовище, озброїти майбутніх спеціалістів засобами ефективного впливу на нього;

– внаслідок міжгалузевого характеру проблем із навколишнього середовища підготовка кадрів повинна здійснюватись переважно на рівні спеціалізації;

– екологічна освіта і виховання повинні орієнтуватись на активну взаємодію людини із природою, побудовану на науковій основі, на оцінюванні людини як частини природи;

– екологічні знання, доповнені ціннісними орієнтаціями, повинні стати основою екологічної культури й екологічного мислення.

Розвиток екологічної освіти привів до виділення її специфічних особливостей:

1) усвідомлення складності охорони навколишнього середовища та її вивчення з позиції системного аналізу;
2) усвідомлення глобального характеру екологічних проблем;
3) міждисциплінарний підхід;
4) урахування та пізнання зв'язку екологічних проблем з економічними, культурними та соціальними проблемами;
5) різноманітність джерел знання та методів навчання.

Екологічну освіту необхідно звести не стільки до передавання знань з окремих тем, скільки до формування екологічного

світогляду. Економіст, який мислить, повинен розуміти причинно-наслідкові зв'язки у природних явищах, уміти простежити, в якому взаємозв'язку вони з іншими явищами ширшої системи. Екологічні цілі повинні стати базисними цілями економіки.

За останні 15-20 років питання екологічної освіти та виховання зі сфери дискусій про правомірність екологічної освіти змістилося у площину її практичної реалізації. Ця обставина значно впливає на педагогіку й сучасну систему освіти. Зокрема, робиться спроба педагогічного осмислення ключових для сучасної екології категорій – свідомості, моралі, етики, культури та інших понять, правомірність існування яких ще недавно рішуче заперечувалася, як таких, що нібито стоять над мораллю суспільства, а людину ставлять у позицію сліпого поклоніння перед природою, тоді як справжнім завданням екологічної освіти, на думку ідеологів від освіти, слід вважати «наукове обґрунтування перебудови біосфери в інтересах людини».

Екологічна освіта розвиває комунікативні можливості людини через сучасний інформаційно-зв'язковий мінімум кожної людини. Екологічна освіта у вищому навчальному закладі підпорядковується основній меті – дати молоді світоглядні цінності. Тому предмет екології має бути віднесеним до базових дисциплін гуманітарного циклу.

Аналізуючи державні навчальні програми з екології, ми виявили спрямованість на формування екологічної свідомості у студентів, на раціональне використання природних ресурсів, кількість і якість яких щорічно зменшується.

Добір змісту екологічної освіти і виховання у вищому навчальному закладі передбачає певний набір і зміст навчальних предметів, струнку її систему, взаємозв'язок і послідовність введення, визначення знань, умінь і навичок, якими мусить володіти майбутній фахівець з економіки, а також систему поняттєво-термінологічного апарату.

У вищих навчальних закладах України здійснюється єдина (базова) екологічна освіта. Її основою є інтегрований курс «Основи екології», який включає найважливіші аспекти екологічної проблеми і враховує певні концептуальні положення.

– Природне середовище (біосфера) є саморегулівною системою, яка перебуває у стані динамічної рівноваги і виявляє стійкість у досить широкому, але кінцевому діапазоні зовнішніх

впливів. Воно накладає певні обмеження на темпи і масштаби соціально-економічного розвитку людства, які зумовлюються розмірами планети Земля, запасами її ресурсів, можливостями саморегуляції і підтримання рівноваги.

– Стан природного середовища на сучасному етапі розвитку людства є наслідком взаємодії його біологічних і фізичних аспектів з аспектами соціально-економічного і культурного розвитку суспільства. Екологічні проблеми мають глобальний, регіональний, національний і місцевий характер. Аналіз усіх проблем повинен здійснюватися у відповідності з їх проявом, на основі врахування певних вимог екологічного, економічного й політичного характеру, виходячи з ресурсних можливостей природного середовища.

– Виснаження природних ресурсів планети, забруднення середовища й порушення природної рівноваги внаслідок стихійної діяльності людства неминуче призведе до загальнопланетарної екологічної кризи. Потрібно істотно змінити виробничу основу діяльності людства, виходячи з ресурсних можливостей планети Земля, необхідності технологічної модернізації виробництва, яке б максимально вписувалося в біологічні цикли природи.

Під час формування у студентів особистісного ставлення до екологічної дійсності важливо чітко окреслювати коло екологічних проблем усього людства, своєї країни і своєї місцевості. Лише за цих умов можна проводити справді ефективну роботу. Так, під час вивчення теми «Екологічні проблеми оболонок Землі», а саме питання «Екологічні проблеми водного середовища і його охорона», необхідно звернути увагу студентів на обмеженість водних ресурсів нашої країни. Для підкреслення важливого значення води в житті людини можна використати слова Антуана де Сент-Екзюпері: «Вода, ти не маєш ні смаку, ні запаху, тебе неможливо описати, тобою насолоджуюся, не знаючи, що ти таке. Не можна сказати, що ти необхідна для життя, ти – саме життя».

Дидактичними умовами формування екологічних знань у студентів економічних спеціальностей є такі:

Принцип науковості. Його сутність – усі факти, знання, положення і закони, що вивчаються, повинні бути науково правильні, так само, як і спосіб обґрунтування положень і законів та формування понять у процесі навчання[7].

---

[7] Скрипко Т. Екологічний аспект освітньої діяльності українців найдавніших часів. *Освіта і управління*. 1998. № 2. С. 112–121.

Принцип систематичності й послідовності навчання передбачає системність у роботі студентів (систематичне відвідування занять, увага на лекціях, систематичне повторення навчального матеріалу).

Принцип доступності навчання. Реалізація цього принципу передбачає: врахування рівня розвитку; індивідуальних особливостей; дотримання правил: від простого – до складного, від відомого – до невідомого, від близького – до далекого.

Принцип зв'язку навчання з життям. Реалізацію цього принципу забезпечують: використання на семінарах життєвого досвіду студентів; застосування набутих знань у практичній діяльності; розкриття практичної значимості знань; безпосередня участь студентів у громадському житті.

Метод екологічної ідентифікації полягає в педагогічній актуалізації особистої причетності людини до того чи іншого природного об'єкта, ситуацій, обставин, в яких він перебуває. Цей метод стимулює процес психологічного моделювання стану природних об'єктів, сприяє кращому розумінню цього стану, що поглиблює уявлення школярів про даний об'єкт. Крім того, цей механізм актуалізує відповідну поведінку щодо цього об'єкта.

Метод екологічної емпатії має на меті педагогічну актуалізацію співпереживання людини за стан природного об'єкта, а також співчуття йому. Це стимулює проекцію особистих станів на природні об'єкти через ототожнення з ними (співпереживання), а також переживання особистих емоцій та почуттів із приводу стану природних об'єктів (співчуття). Таким чином формується суб'єктифікація природних об'єктів.

Метод екологічної рефлексії полягає в педагогічній актуалізації самоаналізу людиною своїх дій та вчинків з точки зору їх екологічної доцільності. Цей метод стимулює усвідомлення того, який вигляд може мати поведінка людини, і точки зору тих природних об'єктів, яких вона стосується.

Ураховуючи досвід спеціалістів у галузі екологічного виховання, можна виділити чотири типи студентів за їх психолого-дидактичними особливостями.

1. Це ті, хто навчається через почуття. Вони чутливіші до людей та оточення. Тому вони краще навчаються через специфічний досвід, менше орієнтовані на авторитети, ніж інші, не шукають теоретичних підходів до вирішення проблеми, більшу допомогу отримують від дискусій та роботи в парах, тому в навчальних

ситуаціях більш відкриті, швидко адаптуються до них та діють переважно інтуїтивно.

2. Ті, хто навчається, спостерігаючи та слухаючи. Учні та студенти цієї групи довіряють лише ретельному дослідженню у формуванні висновків, надають перевагу ситуаціям, які дозволяють їм бути об'єктивними спостерігачами. Вони спираються лише на особисті думки та відчуття під час формування поглядів на конкретну проблему, можуть бачити різні перспективи і часто шукають суть предмета. Тому вони більше розкриваються на лекціях та демонстраціях.

3. Ті, хто навчається через мислення. Ця група людей винаходить аналітичні, концептуальні підходи у вирішенні проблеми, надає перевагу винятково логічному мисленню та раціональній оцінці. Вони більш орієнтовані на речі та символи, краще навчаються в авторитарно спрямованих ситуаціях, які базуються на теоріях та синтетичному аналізі; часто спростовують «винахідливе» навчання і віддають перевагу систематичному плануванню та навчанню.

4. Ті, хто навчається через дію. Останню групу складають дійові особи, які довіряють винятково експериментам і краще навчаються, коли мають можливість узяти участь у проекті або дискусіях. Вони ігнорують лекції та інші пасивні форми навчання та виховання.

ВИСНОВКИ

«Зелені рухи» та «зелені технології» є спонукальним та об'єднувальним моментом у боротьбі за збереження довкілля. Практичне застосування «зеленої хімії» грунтується на використанні 12 принципів: запобігання утворенню відходів; раціональне (ефективне) використання вихідних реагентів; зниження загроз процесів і продуктів синтезу; конструювання «зелених» матеріалів; виключення використання небезпечних допоміжних реагентів; енергозбереження в хімічних процесах; використання відновлюваної сировини; зменшення числа проміжних стадій технологічних процесів; використання каталізаторів для прискорення хімічних процесів; біорозкладання для отримання сполук, безпечних для навколишнього середовища; забезпечення аналітичного контролю в реальному часі; попередження можливості техногенних аварій.

Основними завданнями екології є: дослідження особливостей організації життя, в тому числі в зв'язку з антропогенним, що є результатом людської діяльності, впливом на природні системи;

створення наукової основи раціональної експлуатації біологічних ресурсів; прогнозування змін природи під впливом діяльності людини; збереження середовища існування людини.

Вирішення цих завдань допоможе розв'язанню таких проблем господарської діяльності суспільства: інтенсифікація виробництв ряду галузей; збереження та заощадження сировини; охорона історичних та архітектурних пам'яток; збільшення часу експлуатації промислових та житлових комплексів; збільшення тривалості життя та зниження захворюваності людей в умовах урбанізованого середовища; вдосконалення механізмів взаємодії суспільства та природи.

Запропонований навчальний курс «Основи екології» займе належне місце серед найголовніших фундаментальних дисциплін. Навчальна програма курсу розроблена з урахуванням сучасних вимог до рівня екологічних знань, наявності базових екологічних знань, отриманих у школі, світового й вітчизняного досвіду. Зміст курсу «Основи екології» побудовано на основі сучасних уявлень про сутність, структуру, цілі й завдання екології, її значення в житті суспільства, місце й зв'язок з іншими науками. Система отриманих на цій основі знань має забезпечити формування чітких і обґрунтованих уявлень про взаємодію і взаємозв'язок усіх компонентів у природничій, соціальній і технологічній сферах, про стратегію і тактику збереження й стабільного розвитку життя на Землі.

АНОТАЦІЯ

Досліджено екологічні проблеми сталого розвитку та збереження навколишнього середовища в контексті навчання студентів. Наведено перелік основоположних принципів „зеленої хімії". Розглянуто основні завдання екології та проблеми господарської діяльності суспільства. Стан сучасної екологічної освіти співставлено з екологічною ситуацією сьогодення. Запропоновано курс «Основи екології», що включає теоретичні, стратегічні, тактичні проблеми. Наведено структурний зміст цього курсу. Запропоновано методологічну основу екологічної освіти у вищих навчальних закладах. Визначено предмет дослідження, основні завдання та міждисциплінарний характер екологічної науки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тарасова Н.П., Нефедов О.М., Лунин В.В. Химические проблемы устойчивого развития и сохранения окружающей среды. *Успехи химии*. 2010. Т. 79. № 6. С. 491–492.

2. Лукашенко Т.Ф., Малишев В.В. Екологічна хімія. Навчальний посібник до спецкурсу «Екологічна хімія» для студентів напрямів підготовки «Хімічна технологія та інженерія», «Екологія», «Біологія». Київ : Університет «Україна», 2012. 269 с.

3. Anastas P., Eghbali N. Green Chemistry: Principles and Practice. *Chem. Soc. Rev*. 2010. V. 39. P. 301–312. URL : https://doi.org/10.1039/B918763B

4. Лукашенко Т.Ф., Малышев В.В. Формирование экологической компетентности – важная составляющая экологического образования. *Экологическая химия*. 2012. Т. 21. № 4. С. 252–256.

5. Проблеми освіти : наук.-метод. зб. Київ : ІЗМН, 1998. Вип. 14. 232 с.

6. Корсак К.В., Плахотнік О.В. Основи екології : навч. посібн. 3-е вид., перероб. і доп. Київ : МАУП, 2002. 296 с.

7. Скрипко Т. Екологічний аспект освітньої діяльності українців найдавніших часів. *Освіта і управління*. 1998. № 2. С. 112–121.

Information about authors:

Malyshev V. V.,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Director of Institute of Engineering & Technology
Open International University of Human Development “Ukraine”
23, Lvivska St., Kyiv, 03115, Ukraine

Shakhnin D. B.,
Ph.D., Associated Professor,
Associated Professor of the Department
of Modern Engineering and Nanotechnologies
Open International University of Human Development “Ukraine”
23, Lvivska St., Kyiv, 03115, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.12

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МОДЕЛІ ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ ДЛЯ ВИБОРУ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИРОБНИЦТВА РЕА

Мосьпан Д. В., Фомовська О. В.

ВСТУП

Бурхливий розвиток мікроелектроніки за останні 25 років зробив очевидним розуміння того, що необхідна радикальна зміна та вдосконалення методів складання виробів для всіх областей її застосування. Мініатюризація радіо- електронних апаратів (РЕА) призвела до повсюдного використання технології поверхневого монтажу (SMT – Surface Mount Technology) замість класичного вивідного монтажу (THT – Through Hole Technology), при виробничому складанні електронних модулів 0 і 1 структурних рівнів. Це дало не тільки зменшення масо-габаритних параметрів, а й значне підвищення якості та надійності виробів завдяки застосуванню більш сучасних матеріалів і компонентів. Важливим фактором є значне зменшення трудомісткості виробничих циклів із подальшим зниженням собівартості виробів і досягнення сучасного технічного рівня, що відповідає сучасним стандартам (ISO 9000).

Підвищення конкурентоспроможності продукції, що випускається, в першу чергу залежить від ефективності функціонування підприємства в цілому. При цьому максимум можливостей у даному напрямку може бути реалізованим тільки в тому випадку, якщо технологічні процеси є оптимізованими за єдиним критерієм оптимізації. Наявність декількох варіантів вирішення такого завдання призводить до задачі вибору найкращого варіанту технологічного процесу (ТП), який має назву оптимального. За своєю суттю такі зміни технологічного процесу відповідають структурній оптимізації, хоча часто густо плутають це поняття з визначенням екстремального керування за якимось одним вхідним параметром.

Розроблення єдиного критерію ефективності використання ресурсів[1] дала можливість запропонувати загальну первинну оцінку, проте технологія його практичного використання торкається низки моментів, які вимагають більш докладного розгляду. Це стосується визначення вартісних оцінок технологічних продуктів, особливо зношення робочого механізму, який реалізує базову функцію досліджуваної системи[2]. Таким чином, одною з задач даної роботи є параметрична оптимізація, що базується на підставі дослідження сумарного впливу набору вхідних параметрів на режими проведення технологічних процесів зі зміною параметрів вихідних продуктів.

Одним із поширених технологічних процесів виробництва корпусів та кожухів РЕА є холодне листове штампування (ХЛШ), яке дозволяє виготовляти вироби з підвищеною продуктивністю і коефіцієнтом використання металу, зниженими енерговитратами[3]. На поточний час межі промислового використання технології ХЛШ постійно розширюються в напрямку ускладнення геометричної форми виробів, скорочення кількості переходів штампування, зниження собівартості виробів, що збільшує конкурентоспроможність вказаної технології[4].

Оснащення технологічних процесів ХЛШ являє собою важливе завдання, особливо в сучасних умовах, коли для досягнення вищенаведених показників необхідна модернізація наявного обладнання та систем його управління[5]. Така модернізація пов’язана з упровадженням новітніх систем автоматичного управління, які побудовані на сучасному елементному базисі, та оцінки їх ефективності.

---

[1] Lutsenko I. Deployed model of extremal system operation for solving optimal management problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 5/2(71). P. 61–66. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28592.

[2] Lutsenko I. Optimal control of systems engineering. Development of a general structure of the technological conversion subsystem. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 1, Issue 2 (73). P. 43–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36246.

[3] Клещов Г.М. Інформаційні конструкторські масиви штампів холодної листової штамповки. *Вісник Інженерної академії України*. 2010. № 3. С. 74–77.

[4] Калюжний В. Л. Холодне штампування виробу з двома фланцями із листової заготовки шляхом використання операцій витягування, роздачі і осаджування. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво.* 2013. № 2. С. 105–110.

[5] Шамарін Ю.Є., Тітов В.А., Носар Є.А. Напрямки модернізації штамувального обладнання. *Journal of Mechanical Engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute».* 2011. № 62. С. 92–94.

Обладнання для ХЛШ в загальному випадку являє собою складні, багатокомпонентні ієрархічні структури зі складними взаємозв'язками складових елементів та має велике різноманіття конструкцій, що відрізняються за конфігурацією, виконуваними функціями, ступенем універсальності і типізації, що, у свою чергу, викликає необхідність аналізу безлічі елементів, виконання компонувальних робіт, здійснення інженерних розрахунків й ін.

Тому актуальними є розроблення та створення технологій[6], математичних моделей формоутворення виробів, проектування штампового оснащення та прогнозування його довговічності з метою забезпечення експлуатаційної надійності й довговічності машин, агрегатів і деталей[7].

У даній роботі використані відомі наукові напрямки, пов'язані з розробленням моделей параметричного синтезу системи автоматичного управління[8].

Ураховуючи вищезгадане, можемо визначити, що метою даної роботи є розроблення узагальненої моделі параметричного синтезу систем автоматизованого управління (САУ) та окремих моделей параметричного синтезу елементів САУ, які дозволять з єдиних критеріальних позицій комплексно вирішити задачу системного синтезу САУ за багатьма критеріями з наступною оцінкою ефективності обраних рішень.

1. Метод оптимального управління в енергоємних технологічних процесах виробництва РЕА

Підвищення конкурентоспроможності підприємства в першу чергу залежить від ефективності його поточного функціонування. При цьому максимум можливостей у цьому напрямку може бути реалізований тільки в тому випадку, якщо цілі функціонування всіх

---

[6] Калюжний В.Л. Створення інформаційних технологій реалізації інтенсивного пластичного деформування матеріалів та поверхневого зміцнення при виготовленні деталей для забезпечення надійності та довговічності штампів: звіт про НДР (заключ.). *НТУУ «КПІ»*. 2010.

[7] Мосьпан Д.В., Наумова Е.А., Воронин А.В., Драгобецкий В.В. Корректировка режимов упрочнения пластическим деформированием. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии*. – Харьков : НТУ «ХПИ». 2014. № 43(1086). С. 117–122.

[8] Невлюдов І.Ш., Токарєва О.В. Автоматичне управління технологічними об'єктами: Підручник. Київ : НАУ, 2018. 200 с.

систем підприємства є узгодженими, а процеси цих систем є оптимізованими за єдиним критерієм оптимізації.

Створення моделі цільової розгорнутої операції дозволило розробити єдиний критерій ефективності використання ресурсів. Однак технологія його практичного використання торкається низки моментів, що вимагають більш докладного роз'яснення.

Це стосується побудови архітектури керованої системи і визначення вартісних оцінок технологічних продуктів, особливо зношення робочого механізму, що реалізує базову функцію досліджуваної системи.

Загальною тенденцією системотехніки є сприйняття систем САУ як об'єктів, технологічні процеси яких підлягають оптимізації[9].

Практичному використанню принципів оптимального управління заважає невизначеність, пов'язана з підміною понять, коли пошук екстремуму визначають як пошук оптимуму.

При цьому можливі п'ять основних варіантів. Вибір управління ґрунтується:

– на пошуку екстремуму деякого технічного параметра;

– на економічному показнику (прибутку, витратах, рентабельності);

– на синтетичному показнику, що об'єднує економічні та технічні параметри багатокритеріальної оптимізації;

– на мінімізації часу;

– на максимізації продуктивності[10].

При цьому загальновідомо, що із двох варіантів управління кращим вважається той, який є більш ефективним. Тобто оптимальним, за визначенням, є управління, яке забезпечує найвищу ефективність процесу в рамках накладених обмежень.

Також загальновідомо, що для реалізації технологічної операції потрібні продукти перетворення та енергетичні, а на виході, після завершенню технологічної операції, формується споживчий продукт. У процесі функціонування техніка зношується, що призводить до споживання технічного продукту у вигляді зношення.

---

[9] Lutsenko I., Fomovskaya E. Identification of target system operations. The practice of determining the optimal control / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2014. №.6(2(78)). P. 30–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.54432.

[10] Zhang, S., Zhang C., Han G., Wang Q. Optimal Control Strategy Design Based on Dynamic Programming for a Dual-Motor Coupling-Propulsion System / *The Scientific World Journal*. 2014. Vol. 2014. P. 1–9. DOI: 10.1155/2014/958239.

Ґрунтуючись на сказаному, можемо стверджувати, що ефективність операції залежить від відомих економічних показників, таких як витрати (RE)[11], прибуток або додана вартість (PE–RE) і рентабельність [(PE–RE)/RE]. Дуже часто неадекватно оцінюють ефективність досліджуваної операції в загальному випадку, оскільки ці вирази, як мінімум, не побудовані з використанням всіх базових показників цільової операції.

Те ж можна сказати і про спроби оцінювати ефективність, спираючись на показник «час» або продуктивність.

Не виправляють ситуацію і синтетичні показники, в яких, на додаток до економічних показників, штучно додані якісь технологічні параметри. Аналогічні аргументи можна привести і щодо багатокритеріального підходу.

У роботі[12] запропоновано показник ефективності використання ресурсів, який спирається на базові показники цільової операції. Також розглядається проблема практичного використання розробленого критерію для вирішення завдання пошуку оптимального управління, що забезпечує вихід на найбільш ефективну цільову операцію.

Суть полягає в тому, що для вирішення задач подібного типу неможливо використовувати класичні методи через особливості технологічних операцій, якість вихідного продукту яких залежить від часу.

Крім того, можливість повноцінної оптимізації може бути отримана тільки в тому разі, коли досліджуваний процес не поєднує в собі декілька технологічних операцій, а вибір адекватного критерію оптимізації не означає автоматичне отримання достовірного результату без повного врахування всіх значущих чинників.

Тому метою даної роботи є дослідження факторів, що впливають на процес оптимізації системи автоматичного управління технологічними процесами виробництва елементів РЕА.

Виходячи зі сказаного, завданнями, вирішити які необхідно для досягнення поставленої мети, були обрані такі:

---

[11] Lapygin Y., Prokhorov N. Cost Management in the enterprise. Eksmo, 2007. 102 p.

[12] Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 2, Issue 2 (74). P. 35–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38963.

– визначення зношення виробничих механізмів у залежності від управління;

– визначення кількісних інтегральних параметрів вхідних і вихідних продуктів системи у вартісних величинах, які можуть бути порівняними;

– визначення ефективності цільової операції на основі сигнатури мети, в залежності від управління;

– оцінка реакції критерію на зміну величини вартісної оцінки вихідного продукту;

– інтерпретація результатів дослідження.

2. Узагальнена модель параметричного синтезу елементів САУ

Після вибору типу і виду штампувальних пресів (ШП) визначаються вимоги і обмеження на системи автоматичного управління (САУ) та її елементи. Окремі моделі оцінки та вибору САУ і її елементів відносяться до завдань параметричного синтезу.

Завдання параметричного синтезу елементів САУ полягає в такому[13,14,15].

Відомо: безліч елементів САУ $ES = \{ES^m\}$ $ES = \{ES^m\}$, $m = 1, m'$.

Введемо змінну, $X_{mow} = \{0;1\}$, де $X_{mov} = 1$, якщо m-й елемент САУ обраний o-го типу w-го виду, $X_{mov} = 0$ в іншому випадку.

Кожна САУ, характеризується низкою показників:

– функціональні:

1) надійність елементів САУ – N_{mow};

2) напрацювання на відмову елементів САУ – NOT_{mow};

3) статична помилка елементів САУ – CTE_{mow};

4) кінетична помилка елементів САУ – KE_{mow};

5) час регулювання елементів САУ – TR_{mow};

6) перерегулювання елементів САУ – PR_{mow};

---

[13] Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. Б.И. Копылова. Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.

[14] Парк Д., Маккей С. Сбор данных в системах контроля и управления. Москва : Группа ИДТ, 2006. 504 с.

[15] Гульков Г.И., Петренко Ю.Н., Раткевич Е.П., Симоненков О.Л. Системы автоматизированного управления електро-приводами. Москва : Новое знание, 2007. 400 с.

7) амплітуда флуктуації елементів САУ – SF_{mow};

8) стійкість елементів САУ – PU_{mow};

9) обсяг елементів САУ – G_{mow};

10) вага елементів САУ – P_{mow};

11) температурний діапазон експлуатації елементів САУ – TRE_{mow};

12) діапазон вологості експлуатації елементів САУ – DVE_{mov};

– витратні:

1) вартість елементів САУ – C_{mow};

2) час проектування елементів САУ – TPR_{mow};

3) кількість споживаної енергії елементів САУ – PEN_{mow}.

Як приватні критерії для вибору САУ можуть бути:

– максимальна надійність елементів САУ:

$$N^{САУ} = max\sum_{m=1}^{3}\sum_{o=1}^{o^m}\sum_{w=1}^{w^o} N_{mow}X_{mow}; \quad (1)$$

– максимальне напрацювання на відмову елементів САУ:

$$NOT^{САУ} = max\sum_{m=1}^{3}\sum_{o=1}^{o^m}\sum_{w=1}^{w^o} NOT_{mow}X_{mow}; \quad (2)$$

– мінімальна статична помилка елементів САУ:

$$CTE^{САУ} = \min\sum_{m=1}^{3}\sum_{o=1}^{o^m}\sum_{w=1}^{w^o} CTE_{mow}X_{mow}; \quad (3)$$

– мінімальна кінетична помилка елементів САУ:

$$KE^{САУ} = \min\sum_{m=1}^{3}\sum_{0=1}^{o^m}\sum_{w=1}^{w^0} KE_{mow}X_{mow}; \quad (4)$$

– мінімальний час регулювання елементів САУ:

$$TR^{САУ} = \min\sum_{m=1}^{3}\sum_{o=1}^{o^m}\sum_{w=1}^{w^0} TR_{mow}X_{mow}; \quad (5)$$

– мінімальне перерегулювання елементів САУ:

$$PR^{САУ} = \min \sum_{m=1}^{3} \sum_{o=1}^{o^m} \sum_{w=1}^{w^0} PR_{mow} X_{mow} ; \quad (6)$$

– мінімальна амплітуда флуктуації елементів САУ:

$$SF^{САУ} = \min \sum_{m=1}^{3} \sum_{o=1}^{o^m} \sum_{w=1}^{w^0} SF_{mow} X_{mow} ; \quad (7)$$

– максимальна стійкість елементів САУ:

$$PU^{САУ} = max \sum_{m=1}^{3} \sum_{o=1}^{o^m} \sum_{w=1}^{w^0} PU_{mow} X_{mow} ; \quad (8)$$

– мінімальний обсяг елементів САУ:

$$G^{САУ} = \min \sum_{m=1}^{3} \sum_{o=1}^{o^m} \sum_{w=1}^{w^0} G_{mow} X_{mow} ; \quad (9)$$

– мінімальна вага елементів САУ:

$$P^{САУ} = \min \sum_{m=1}^{3} \sum_{o=1}^{o^m} \sum_{w=1}^{w^0} P_{mow} X_{mow} ; \quad (10)$$

– мінімальна вартість елементів САУ:

$$C^{САУ} = \min \sum_{m=1}^{3} \sum_{o=1}^{o^m} \sum_{w=1}^{w^0} C_{mow} X_{mow} ; \quad (11)$$

– мінімальний час проектування елементів САУ:

$$TPR^{САУ} = \min \sum_{m=1}^{3} \sum_{o=1}^{o^m} \sum_{w=1}^{w^0} TPR_{mow} X_{mow} ; \quad (12)$$

– мінімальна кількість споживаної енергії елементів САУ:

$$PEN^{САУ} = \min \sum_{m=1}^{3} \sum_{o=1}^{o^m} \sum_{w=1}^{w^0} PEN_{mow} X_{mow} . \quad (13)$$

Область допустимих рішень під час вибору елементів САУ визначається такими обмеженнями:

– надійність елементів САУ повинна бути більше заданої N_3^m:

$$\sum_{0=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} N_{mow} X_{mow} \geq N_3^m ; m = 1,3 ; \quad (14)$$

– напрацювання на відмову елементів САУ повинна бути більше заданої NOT_3^m:

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} NOT_{mow} X_{mow} \geq NOT_3^m ; m = 1,3 ; \quad (15)$$

– статична помилка елементів САУ повинна бути менше заданої CTE_3^m:

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} CTE_{mow} X_{mow} \leq CTE_3^m ; m = 1,3 ; \quad (16)$$

– кінетична помилка елементів САУ повинна бути менше заданої KE_3^m:

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} KE_{mow} X_{mow} \leq KE_3^m ; m = 1,3 ; \quad (17)$$

– час регулювання елементів САУ має бути менше заданого TR_3^m:

$$\sum_{0=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w_0} TR_{mow} X_{mow} \leq TR_3^m ; m = 1,3 ; \quad (18)$$

– перерегулювання елементів САУ має бути менше заданого PR_3^m:

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} PR_3^m ; m = 1,3 ; \quad (19)$$

– амплітуда флуктуації елементів САУ повинна бути менше заданої SF_3^m:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} SF_{mow}X_{mow} \le SF_3^{CAY};\ m = 1,3; \tag{20}$$

– стійкість елементів САУ повинна бути більше заданої PU_3^m:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} PU_{mow}X_{mow} \ge PU_3^m;\ m = 1,3; \tag{21}$$

– параметри кожного елемента САУ (GX_{mov} – ширина, GY_{mov} – довжина, GZ_{mov} – висота), повинні бути менше заданих GX_3^m, GY_3^m, GZ_3^m:

$$\begin{cases} \sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} GX_{mow}X_{mow} \le GX_3^m \\ \sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} GY_{mow}X_{mow} \le GY_3^m;\ m = 1,3; \\ \sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} GZ_{mow}X_{mow} \le GZ_3^m \end{cases} \tag{22}$$

– вага елементів САУ повинна бути менше заданої P_3^m:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w_0} P_{mov}X_{mow} \le P_3^m;\ P = 1,3; \tag{23}$$

– температурний діапазон експлуатації елементів САУ повинен бути більше нижньої межі TRE_{3H}^m і менше верхньої межі TRE_{3B}^m:

$$TRE_{3H}^m \le \sum_{0=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} TRE_{mow}X_{mow} \le TRE_{3B}^m;\ m = 1,3; \tag{24}$$

– діапазон вологості експлуатації елементів САУ повинен бути більше нижньої межі DVE_{3H}^{m} і менше верхньої межі DVE_{3H}^{m} :

$$DVE_{3H}^{m} \le \sum_{0=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} DVE_{mow} X_{mow} \le DVE_{3B}^{m};\ m = 1,3; \qquad (25)$$

– вартість елементів САУ повинна бути менше заданої C_3^m :

$$\sum_{0=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w_0} C_{mow} X_{mow} \le C_3^m;\ m = 1,3; \qquad (26)$$

– час проектування елементів САУ має бути менше заданого TPR_3^m :

$$\sum_{0=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} TPR_{mow} X_{mow} \le TPR_3^m;\ m = 1,3; \qquad (27)$$

– кількість споживаної енергії елементів САУ має бути менше заданої PEN_3^m :

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} PEN_{mow} X_{mow} \le PEN_3^m;\ m = 1,3; \qquad (28)$$

– з безлічі елементів САУ може бути обраний тільки один:

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} X_{mow} = 1;\ m = 1,3. \qquad (29)$$

Математичні моделі (1) – (29) відноситься до завдань лінійного багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними. Їх рішення в загальному вигляді представляє значні труднощі, як через складність обчислень, так і з-за можливості ідентифікації деяких характеристик тільки у процесі функціонування. Для її спрощення проводиться її декомпозиція на завдання оцінки і вибору елементів САУ – мікроконтролера (МК), частотного перетворювача (ЧП), вимірювального перетворювача (ВП).

3. Вибір типу і виду мікроконтролера

Мікроконтролери можуть виконувати безліч типових функцій завдяки вбудованому обладнанню. Для виконання поставленої технічної задачі може знадобитися певний набір вбудованого обладнання, отже, не може оцінюватися ефективність МК, які не мають даного обладнання[16][17].

Відомо:

– безліч типів МК $САУ^1 = \{САУ_0^1\}, o = 1, o^1$;

– безліч видів в кожному типі МК $САУ_0^1 = \{САУ_{0w}^1\}, w = 1, w^o$.

Отже, змінна $X_{1ow} = 1$, якщо МК обраний o-го типу w-го виду, $X_{1ow} = 0$ в іншому випадку.

Необхідно визначити тип і вид МК, який характеризується низкою показників:

– функціональні:

1) надійність МК o-го типу w-го виду – N_{1ow};

2) напрацювання на відмову МК o-го типу w-го виду $NOT_{1_{ow}}$;

3) тактова частота МК o-го типу w-го виду – TF_{1ow};

4) обсяг Flash МК o-го типу w-го виду – VF_{1ow};

5) кількість портів у МК o-го типу w-го виду – KVP_{1ow};

6) обсяг EEPROM МК o-го типу w-го виду – VE_{1ow};

7) обсяг RAM МК o-го типу w-го виду – VR_{1ow};

8) температурний діапазон роботи МК o-го типу w-го виду – TD_{1ow};

9) споживання енергії МК o-го типу w-го виду – PEN_{1ow};

– витратні:

1) вартість МК o-го типу w-го виду – PEN_{1ow};

Як приватні критерії для вибору МК можуть бути:

– максимальна надійність МК:

---

[16] Парр Э. Программируемые контроллеры. Руководство для инженера. Programmable Controllers: An Engineer’s Guide. Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2007. 520 с.

[17] Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR микрокон-троллеров. Messen, Steuem und Regeln mit AVR-Mikrocontrollem. Москва : МК-Пресс, 2006. 208 с.

$$N^{MK} = max\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} N_{1_{ow}} X_{1ow}\,; \qquad (30)$$

– максимальне напрацювання на відмову МК:

$$NOT^{MK} = max\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} NOT_{1ow} X_{1ow}\,; \qquad (31)$$

– максимальна тактова частота МК:

$$TF = max\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w_0} TF_{1ow} X_{1ow}\,; \qquad (32)$$

– максимальний обсяг Flash МК:

$$VF^{MK} = max\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} VF_{1ow} X_{1ow}\,; \qquad (33)$$

– максимальна кількість портів у МК:

$$KVP^{MK} = max\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} KVP_{1ow} X_{1ow}\,; \qquad (34)$$

– максимальний обсяг EEPROM МК:

$$VE^{MK} = max\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} VE_{1ow} X_{1ow}\,; \qquad (35)$$

– максимальний обсяг RAM МК:

$$VR^{MK} = max\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w_0} VR_{1ow} X_{1ow}\,; \qquad (36)$$

– мінімальне споживання енергії МК:

$$PEN^{MK} = \min \sum_{o=1}^{o^1} \sum_{w=1}^{w^0} PEN_{1ow} X_{1ow} ; \quad (37)$$

– мінімальна вартість МК:

$$PEN^{MK} = \min \sum_{o=1}^{o^1} \sum_{w=1}^{w^0} PEN_{1ow} X_{1ow} . \quad (38)$$

Область допустимих рішень під час вибору типу і виду МК визначається обмеженнями:

– надійність МК повинна бути більше заданої N_3^{MK} :

$$\sum_{o=1}^{o^1} \sum_{w=1}^{w^0} N_{1_{ow}} X_{1ow} \geq N_3^{MK} ; \quad (39)$$

– напрацювання на відмову МК повинне бути більше заданого NOT_3^{MK} :

$$\sum_{o=1}^{o^1} \sum_{w=1}^{w^0} NOT_{1ow} X_{1ow} \geq NOT_3^{MK} ; \quad (40)$$

– тактова частота МК повинна бути більше заданої TF_3^{MK} :

$$\sum_{o=1}^{o^1} \sum_{w=1}^{w^o} TF_{1ow} X_{1ow} \geq TF_3^{MK} ; \quad (41)$$

– обсяг Flash МК повинен бути більше заданого VF_3^{MK} :

$$\sum_{o=1}^{o^1} \sum_{w=1}^{w^0} C_{1ow} X_{1ow} \leq C_3^{MK} ; \quad (42)$$

– кількість портів у МК має бути більше заданого KVP_3^{MK} :

$$\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} KVP_{1ow}X_{1ow} \geq KVP_3{}^{MK}; \quad (43)$$

– обсяг EEPROM МК повинен бути більше заданого VE_3^{MK}:

$$\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} VE_{1ow}X_{1ow} \geq VE_3^{MK}; \quad (44)$$

– обсяг RAM МК повинен бути більше заданого VR_3^{MK}:

$$\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} VR_{1ow}X_{1ow} \geq VR_3^{MK}; \quad (45)$$

– температурний діапазон роботи МК повинен бути більше нижньої межі TD_{3H}^{MK} і менше верхньої межі TD_{3B}^{MK}:

$$TD_{3H}^{MK} \leq \sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} TD_{1ow}X_{1ow} \leq TD_{3B}^{MK}; \quad (46)$$

– споживання енергії МК має бути менше заданого PEN_3^{MK}:

$$\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} PEN_{1ow}X_{1ow} \leq PEN_3^{MK}; \quad (47)$$

– вартість МК повинна бути менше заданої C_3^{MK}:

$$\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} C_{1ow}X_{1ow} \leq C_3^{MK}; \quad (48)$$

– з безлічі типів і видів МК може бути обраний тільки один:

$$\sum_{o=1}^{o^1}\sum_{w=1}^{w^0} X_{1ow} = 1. \quad (49)$$

Математична модель (30) – (49) відноситься до завдань лінійного багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними.

4. Вибір типу і виду частотного перетворювача

Відомо:

– безліч типів ЧП $САУ^2 = \{САУ^2{}_o\}; o = 1, o^2$;

– безліч видів у кожному типі ЧП $САУ^2{}_o = \{САУ^2{}_{ow}\}; w = 1, w^o$.

Отже, змінна $X_{2ow} = 1$, якщо, ЧП обраний o-го типу w-го виду, $X_{2ow} = 0$ в іншому випадку.

Необхідно визначити тип і вид ЧП, які характеризується низкою показників:

– функціональні:

1) надійність ЧП o-го типу w - го виду – N_{2ow};

2) напрацювання на відмову ЧП o-го типу w-го виду – NOT_{2ow};

3) потужність ЧП o-го типу w- го виду – DW_{2ow};

4) частота вихідної напруги ЧП o-го типу w-го виду – FU_{2ow};

5) ступінь захисту ЧП o-го типу w-го виду – SZ_{2ow};

6) температурний діапазон роботи ЧП o-го типу w-го виду – KU_{2ow};

7) кількість вбудованих регуляторів в ЧП o-го типу w-го виду – KU_{2ow};

8) обсяг ЧП o-го типа w-го вида – G_{2ow};

9) вага ЧП o-го типа w-го вида – P_{2ow};

– витратні:

1) вартість ЧП o-го типу w-го виду – C_{2ow}.

Як приватні критерії для вибору ПП можуть бути:

– максимальна надійність ЧП:

$$N^{ЧП} = max\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} N_{2ow}X_{2ow}; \qquad (50)$$

– максимальне напрацювання на відмову ЧП:

$$NOT^{ЧП} = max\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} NOT_{2ow}X_{2ow}; \qquad (51)$$

– максимальна потужність ЧП:

$$DW^{ЧП} = max\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} DW_{2ow}X_{2ow}\,; \qquad (52)$$

– максимальна частота вихідної напруги ЧП:

$$FU^{ЧП} = max\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} FU_{2ow}X_{2ow}\,; \qquad (53)$$

– максимальний ступінь захисту ЧП:

$$SZ^{ЧП} = max\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} SZ_{2ow}X_{2ow}\,; \qquad (54)$$

– максимальна кількість вбудованих регуляторів ЧП:

$$KU^{ЧП} = max\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} KU_{2ow}X_{2ow}\,; \qquad (55)$$

– мінімальний обсяг ЧП:

$$G^{ЧП} = \min\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} G_{2ow}X_{2ow}\,; \qquad (56)$$

– мінімальна вага ЧП:

$$P^{ЧП} = \min\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} P_{2ow}X_{2ow}\,; \qquad (57)$$

– мінімальна вартість ЧП:

$$C^{ЧП} = \min\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} C_{2ow}X_{2ow}\,. \qquad (58)$$

Область допустимих рішень при виборі типу і виду ЧП визначається обмеженнями:

– надійність ЧП повинна бути більше заданої $\forall U_{al} = 1$:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} N_{2ow} X_{2ow} \geq N_3^{ЧП}; \qquad (59)$$

– напрацювання на відмову ЧП повинна бути більше заданого $NOT_3^{ЧП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} NOT_{2ow} X_{2ow} \geq NOT_3^{ЧП}; \qquad (60)$$

– потужність ЧП повинна бути більше заданої $DW_3^{ЧП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} DW_{2ow} X_{2ow} \geq DW_3^{ЧП}; \qquad (61)$$

– частота вихідної напруги ЧП повинна бути більше заданої $FU_3^{ЧП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} FU_{2ow} X_{2ow} \geq FU_3^{ЧП}; \qquad (62)$$

– ступінь захисту ЧП повинна бути більше заданої $SZ_3^{ЧП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} SZ_{2ow} X_{2ow} \geq SZ_3^{ЧП}; \qquad (63)$$

– температурний діапазон роботи ЧП повинен бути більше нижньої межі $TD_{3H}^{ЧП}$ і менше верхньої межі $TD_{3B}^{ЧП}$:

$$TD_{3H}^{ЧП} \leq \sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} TD_{2ow} X_{2ow} \leq TD_{3B}^{ЧП}; \qquad (64)$$

– кількість вбудованих регуляторів в ЧП повинно бути більше заданого $KU_3^{ЧП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} KU_{2ow}X_{2ow} \geq KU_3^{ЧП}; \qquad (65)$$

– параметри ЧП (GX_{2ow} – ширина, GY_{2ow} – довжина, GZ_{2ow} – висота), повинні бути менше заданих $GX_3^{ЧП}$, $GY_3^{ЧП}$, $GZ_3^{ЧП}$:

$$\begin{cases} \sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} GX_{2ow}X_{2ow} \leq GX_3^{ЧП} \\ \sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} GY_{2ow}X_{2ow} \leq GY_3^{ЧП} \\ \sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} GZ_{2ow}X_{2ow} \leq GZ_3^{ЧП} \end{cases} \qquad (66)$$

– вага ЧП повинна бути менше заданої $P_3^{ЧП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} P_{2ow}X_{2ow} \leq P_3^{ЧП}; \qquad (67)$$

– вартість ЧП повинна бути менше заданої $C_3^{ЧП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} C_{2ow}X_{2ow} \leq C_3^{ЧП}; \qquad (68)$$

– з безлічі типів і видів ЧП може бути обраний тільки один:

$$\sum_{o=1}^{o^2}\sum_{w=1}^{w^0} X_{2ow} = 1. \qquad (69)$$

Математична модель (50) – (69) відноситься до завдань лінійного багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними.

5. Вибір типу і виду вимірювальних перетворювачів

Відомо:

– безліч типів ВП $САУ^3 = \{САУ^3{}_0\}; o = 1, o^3$;

– безліч видів в кожному типі ВП $САУ_o{}^3 = \{САУ^3{}_{ow}\}; w = 1, w^0$.

Отже, змінна $X_{3ow} = 1$, якщо ВП обраний o-го типу w-го виду, $X_{3ow} = 0$ в іншому випадку.

Необхідно визначити тип і вид ВП, які характеризується низкою показників:

– функціональні:

1) надійність ВП o-го типу w-го виду – N_{3ow};

2) напрацювання на відмову ВП o-го типу w-го виду – NOT_{3ow};

3) діапазон виміру ВП o-го типу w-го виду – DI_{3ow};

4) динамічна точність ВП o-го типу w-го виду – DQ_{3ow};

5) статична точність ВП o-го типу w-го виду – SQ_{3ow};

6) коефіцієнт перетворення ВП o-го типу w-го виду – KPR_{3ow};

7) потужність вихідного сигналу ВП o-го типу w-го виду – WS_{3ow};

8) стійкість ВП o-го типу w-го виду – PU_{3ow};

9) обсяг ВП o-го типу w-го виду – G_{3ow};

10) вага ВП o-го типа w-го вида – P_{3ow};

– витратні:

1) вартість ВП o-го типа w-го вида – C_{3ow}.

Як приватні критерії для вибору ВП можуть бути:

– максимальна надійність ВП:

$$N^{ВП} = max\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} N_{3ow}X_{3ow}; \qquad (70)$$

– максимальне напрацювання на відмову ВП:

$$NOT^{ВП} = max\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} NOT_{3ow}X_{3ow}; \qquad (71)$$

– максимальний діапазон виміру ВП:

$$DI^{ВП} = max\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} DI_{3ow}X_{3ow}\,; \qquad (72)$$

– максимальна динамічна точність ВП:

$$DQ^{ВП} = max\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} DQ_{3ow}X_{3ow}\,; \qquad (73)$$

– максимальна статична точність ВП:

$$SQ^{ВП} = max\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} SQ_{3ow}X_{3ow}\,; \qquad (74)$$

– максимальний коефіцієнт перетворення ВП:

$$KPR^{ВП} = max\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} KPR_{3ow}X_{3ow}\,; \qquad (75)$$

– максимальна потужність вихідного сигналу ВП:

$$WS^{ВП} = max\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} WS_{3ow}X_{3ow}\,; \qquad (76)$$

– максимальна стійкість ВП:

$$PU^{ВП} = max\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^o} PU_{3ow}X_{3ow}\,; \qquad (77)$$

– мінімальний обсяг ВП:

$$G^{ВП} = \min\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} G_{3ow}X_{3ow}\,; \qquad (78)$$

– мінімальна вага ВП:

$$P^{ВП} = \min \sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} P_{3ow} X_{3ow} ; \quad (79)$$

– мінімальна вартість ВП:

$$C^{ВП} = \min \sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} C_{3ow} X_{3ow} . \quad (80)$$

Область допустимих рішень при виборі типу і виду ВП визначається обмеженнями:

– надійність ВП повинна бути більше заданої $N_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} N_{3ow} X_{3ow} \geq N_3^{ВП} ; \quad (81)$$

– напрацювання на відмову ВП повинна бути більше заданого $NOT_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} NOT_{3ow} X_{3ow} \geq NOT_3^{ВП} ; \quad (82)$$

– діапазон виміру ВП повинен бути більше нижньої межі $DI_{3H}^{ВП}$ і менше верхньої межі $DI_{3B}^{ВП}$:

$$DI_{3H}^{ВП} \leq \sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} DI_{3ow} X_{3ow} \leq DI_{3H}^{ВП} ; \quad (83)$$

– динамічна точність ВП повинна бути більше заданої $DQ_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^3} \sum_{w=1}^{w^0} DQ_{3ow} X_{3ow} \geq DQ_3^{ВП} ; \quad (84)$$

– статична точність ВП повинна бути більше заданої $SQ_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} SQ_{3ow} X_{3ow} \geq SQ_3^{ИП}; \qquad (85)$$

– коефіцієнт перетворення ВП повинен бути більше заданого $KPR_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} KPR_{3ow} X_{3ow} \geq KPR_3^{ВП}; \qquad (86)$$

– потужність вихідного сигналу ВП повинна бути більше заданої $WS_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1`}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} WS_{3ow} X_{3ow} \geq WS_3^{ВП}; \qquad (87)$$

– стійкість ВП повинна бути більше заданої $PU_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} PU_{3ow} X_{3ow} \geq PU_3^{ВП}; \qquad (88)$$

Параметри ВП (GX_{3ow} – ширина, CY_{3ow} – довжина, GZ_{3ow} – висота), повинні бути менше заданих $GX_3^{ВП}$, $GY_3^{ВП}$, $GZ_3^{ВП}$:

$$\begin{cases} \sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} GX_{3ow} X_{3ow} \leq GX_3^{ВП} \\ \sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} GY_{3ow} X_{3ow} \leq GY_3^{ВП} \\ \sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} CZ_{3o_w} X_{3ow} \leq GZ_3^{ВП} \end{cases}; \qquad (89)$$

– вага ВП повинна бути менше заданої $P_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} P_{3ow} X_{3ow} \le P_3^{ВП};\qquad (90)$$

– вартість ВП повинна бути менше заданої $C_3^{ВП}$:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} C_{3ow} X_{3ow} \le C_3^{ВП};\qquad (91)$$

– з безлічі типів і видів ВП може бути обраний тільки один:

$$\sum_{o=1}^{o^3}\sum_{w=1}^{w^0} X_{3ow} = 1\,.\qquad (92)$$

Математична модель (70) – (92) відноситься до завдань лінійного багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними.

Блок сполучення (БС) вибирається в залежності від типів і видів обраних блоків ШП і елементів САУ. Модель вибору типу і виду БС аналогічна для розглянутих вище елементів САУ.

6. Модель вибору типів і видів зв'язків між блоками ШП та елементами САУ

Усі блоки ШП і елементи САУ інформаційно пов'язані один з одним і ці зв'язки відображені в матрицях інцидентності, які являють собою квадратні матриці розмірністю $v' + m'$ заповнені одиницями або нулями, одиниця встановлюється, якщо є зв'язок між обраними компонентами ШП, нуль – в іншому випадку.

Для параметричного синтезу зв'язків між блоками ШП і елементами САУ був введений параметр $U_{al} = \{0,1\}$.

Для синтезу цих зв'язків відомо:

– безліч типів зв'язків $ST = \{ST^S\},\ s = 1, s'$;

– безліч видів зв'язків в кожному типі $ST^s = \{ST^s{}_y\};\ y = 1, y^s$.

Введемо змінну $X_{alsy} = \{0;1\}$, де $X_{alsy} = 1$, якщо обрана лінія зв'язку s-го типу $a - м$-го виду між і 1-м блоками і елементами ШП САУ, $X_{alsy} = 0$ – в іншому випадку.

Необхідно визначити тип і вид зв'язків між блоками ШП і елементами САУ за обраними критеріями і обмеженням.

Кожен тип і вид зв'язків, характеризується низкою показників.

– ***функціональні:***

1) надійність зв'язку – N_{alsy};

2) напрацювання на відмову зв'язку – NOT_{alsy};

3) перешкодозахищеність зв'язку – PZ_{alsy};

4) швидкість передачі даних – VD_{alsy};

– ***витратні:***

1) вартість зв'язку – C_{alsy}.

Параметричний синтез зв'язку між блоками і елементами ШП САУ можна оцінити за такими критеріями:

– максимальна надійність зв'язку:

$$F^C(X_{alsy}) = max \sum_{a=1}^{v'+m'} \sum_{l=1}^{v'+m'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y^s} N_{alsy} U_{al} X_{alsy}; \quad ; \qquad (93)$$
$$a \neq l; \forall U_{al} = 1$$

– максимальне напрацювання на відмову зв'язку:

$$F^C(X_{alsy}) = max \sum_{a=1}^{v'+m'} \sum_{l=1}^{v'+m'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y^s} NOT_{alsy} U_{al} X_{alsy}; \qquad (94)$$
$$a \neq l; \forall U_{al} = 1$$

– максимальна перешкодозахищеність зв'язку:

$$F^C(X_{alsy}) = max \sum_{a=1}^{v'+m'} \sum_{l=1}^{v'+m'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y^s} PZ_{alsy} U_{al} X_{alsy}; ; \qquad (95)$$
$$a \neq l; \forall U_{al} = 1$$

– максимальна швидкість передачі даних:

$$F^C(X_{alsy}) = max \sum_{a=1}^{v'+m'} \sum_{l=1}^{v'+m'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y^s} VD_{alsy} U_{al} X_{alsy}; \quad ; \qquad (96)$$
$$a \neq l; \forall U_{al} = 1$$

– мінімальна вартість:

$$F^C(X_{alsy}) = \min \sum_{a=1}^{v'+m'} \sum_{l=1}^{v'+m'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y^s} C_{alsy} U_{al} X_{alsy}; \quad . \qquad (97)$$
$$a \neq l; \forall U_{al} = 1$$

Область допустимих рішень під час вибору типу і виду зв'язку визначається обмеженнями:

– надійність кожного зв'язку повинна бути більше заданої N_3^{al} :

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y'} N_{alsy} U_{al} \overline{\overline{X}}_{alsy} \geq N_3^{al}; \qquad (98)$$
$$a, l = \overline{1, v' + m'}; a \neq l; \forall U_{al} = 1$$

– напрацювання на відмову кожного зв'язку повинна бути більше заданого NOT_3^{al} :

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y'} NOT_{alsy} U_{al} \overline{\overline{X}}_{alsy} \geq NOT_3^{al}; \qquad (99)$$
$$a, l = \overline{1, v' + m'}; a \neq l; \forall U_{al} = 1$$

– перешкодозахищеність кожного зв'язку повинна бути більше заданої PZ_3^{al}

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y'} PZ_{alsy} U_{al} \overline{\overline{X}}_{alsy} \geq PZ_3^{al}; \qquad (100)$$
$$a, l = \overline{1, v' + m'}; a \neq l; \forall U_{al} = 1$$

– швидкість передачі даних кожного зв’язку повинна бути більше заданої VD_3^{al}:

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y'} VD_{alsy} U_{al} \overline{\overline{X}}_{alsy} \geq VD_3^{al};$$
$$a, l = \overline{1, v' + m'};\ a \neq l;\ \forall U_{al} = 1 \tag{101}$$

– вартість кожного зв’язку повинна бути менше заданої C_3^{al}:

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y'} C_{alsy} U_{al} \overline{\overline{X}}_{alsy} \geq C_3^{al};$$
$$a, l = \overline{1, v' + m'};\ a \neq l;\ \forall U_{al} = 1 \tag{102}$$

– з безлічі типів і видів кожного зв’язку може бути обраний тільки один:

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{y=1}^{y'} \overline{\overline{X}}_{alsy} = 1;\ a, l = \overline{1, v' + m'};\ a \neq l. \tag{103}$$

Математична модель (93) – (103) відноситься до завдань лінійного багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними.

7. Модель вибору програмного засобу для імітаційного моделювання ШП

Для оцінки ефективності обраного набору блоків ШП і елементів САУ необхідно провести імітаційне моделювання їх функціонування. Це можливо зробити за допомогою спеціалізованого програмного засобу (ПЗ). На даний час відома велика кількість ПЗ, які забезпечують чисельні способи і методи моделювання одного і того ж процесу або об’єкта, що дозволяє моделювати складні системи. Для кожного способу передбачені свої набори бібліотечних елементів. Тому завдання полягає в тому, щоб вибрати такі ПЗ, які забезпечать розв’язання зазначеного завдання та нададуть, після процесу моделювання, пакет інформації в зручному вигляді для подальшого аналізу ефективності ШП. Під

час реалізації цих функцій повинні забезпечувати мінімальні витрати часу та фінансів.

Відомо безліч ПЗ моделювання $M = \{M_t\}, t = \overline{1,t'}$, де t' – число ПЗ моделювання, кожен з яких забезпечує можливість побудови імітаційної моделі функціонування синтезованої ШП і її САУ.

Введемо змінну $\widehat{X}_t = \{0,1\}$, де $\widehat{X}_t = 1$, якщо вибрано t-ий програмний засіб моделювання, $\widehat{X}_t = 0$ – в іншому випадку.

Кожна імітаційна модель, що синтезується ПЗ моделювання, характеризується низкою показників:

– функціональні:

1) адекватність імітаційної моделі – $A_t^{ПЗ}$;

2) кількість параметрів ШП, що відображаються імітаційної моделлю; $I_t^{ПЗ}$;

3) кількість елементів імітаційної моделі, які можна редагувати – $UR_t^{ПЗ}$;

4) машинний час, необхідний для роботи імітаційної моделі – $TM_t^{ПЗ}$;

– витратні:

1) вартість ПЗ – $C_t^{ПЗ}$;

2) час синтезу імітаційної моделі – $TSM_t^{ПЗ}$.

Вибір ПЗ моделювання ШП має проводитись за такими критеріями:

– максимальна адекватність імітаційної моделі:

$$A^{ПЗ} = \max \sum_{t=1}^{t'} A_t^{ПЗ} \widehat{X}_t; \tag{104}$$

– максимальна кількість параметрів ШП, що відображаються імітаційної моделлю:

$$I^{ПЗ} = \max \sum_{t=1}^{t'} I_t^{ПЗ} \widehat{X}_t; \tag{105}$$

– максимальна кількість елементів імітаційної моделі, які можна редагувати:

$$UR^{ПЗ} = \max \sum_{t=1}^{t'} UR_t^{ПЗ} \widehat{X}_t; \qquad (106)$$

– мінімальний машинний час, необхідний для роботи імітаційної моделі:

$$TM^{ПЗ} = \max \sum_{t=1}^{t'} TM_t^{ПЗ} \widehat{X}_t; \qquad (107)$$

– мінімальна вартість ПЗ:

$$C^{ПЗ} = \max \sum_{t=1}^{t'} C_t^{ПЗ} \widehat{X}_t; \qquad (108)$$

– мінімальний час синтезу імітаційної моделі:

$$TSM^{ПЗ} = \max \sum_{t=1}^{t'} TSM_t^{ПЗ} \widehat{X}_t; \qquad (109)$$

Область допустимих рішень під час вибору ПЗ визначається обмеженнями:

– адекватність імітаційної моделі повинна бути більше заданої $A_3^{ПЗ}$:

$$\sum_{t=1}^{t'} A_t^{ПЗ} \widehat{X}_t \geq A_3^{ПЗ}; \qquad (110)$$

– кількість параметрів ШП, що відображаються імітаційної моделлю, має бути більше заданих $I_3^{ПЗ}$:

$$\sum_{t=1}^{t'} I_t^{ПЗ} \widehat{X}_t \geq I_3^{ПЗ}; \qquad (111)$$

– кількість елементів імітаційної моделі, які можна редагувати, має бути більше заданого $UR_3^{ПЗ}$:

$$\sum_{t=1}^{t'} UR_t^{ПЗ} \widehat{X}_t \geq UR_3^{ПЗ}; \qquad (112)$$

– машинний час, необхідний для роботи імітаційної моделі, має бути менше заданого $TM_3^{ПЗ}$:

$$\sum_{t=1}^{t'} TM_t^{ПЗ} \widehat{X}_t \geq TM_3^{ПЗ}; \qquad (113)$$

– вартість ПЗ повинна бути менше заданої $C_3^{ПЗ}$:

$$\sum_{t=1}^{t'} C_t^{ПЗ} \widehat{X}_t \geq C_3^{ПЗ}; \qquad (114)$$

– час синтезу імітаційної моделі має бути менше заданого $TSM_3^{ПЗ}$:

$$\sum_{t=1}^{t'} TSM_t^{ПЗ} \widehat{X}_t \geq TSM_3^{ПЗ}; \qquad (115)$$

– з безлічі ПЗ може бути вибрано тільки одне:

$$\sum_{t=1}^{t'} \widehat{X}_t = 1. \qquad (116)$$

Наведена математична модель (104) – (116) відноситься до завдань лінійного багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними.

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено узагальнену модель параметричного синтезу САУ та окремі моделі параметричного синтезу елементів САУ. Ці моделі дозволяють з єдиних критеріальних позицій комплексно вирішити задачу системного синтезу САУ за багатьма критеріями.

Розроблено модель оцінки і вибору типів і видів зв'язків між блоками ШП і елементами САУ. Ця модель, на відміну від наявних, дозволяє оцінити за багатьма критеріями всі типи і види зв'язків, що містяться в ШП і вибрати ефективну.

Дані моделі використовуються під час проектування та модернізації систем управління штампового оснащення та прогнозування його довговічності з метою забезпечення експлуатаційної надійності й довговічності машин, агрегатів і деталей.

АНОТАЦІЯ

У даній роботі розглянуті критерії ефективності моделей параметричного синтезу системи автоматичного управління, а також розроблені математичні моделі підвищення ефективності і оперативності прийнятих рішень під час синтезу систем автоматизованого управління за рахунок обґрунтованого вибору її елементів. Дані моделі використовуються під час проектування штампового оснащення та прогнозування його довговічності з метою забезпечення експлуатаційної надійності й довговічності машин, агрегатів і деталей. Розроблено узагальнену модель параметричного синтезу САУ та окремі моделі параметричного синтезу складових елементів САУ (мікроконтролер, частотний перетворювач, вимірювальний перетворювач). Усі ці моделі, на відміну від наявних, дозволяють з єдиних критеріальних позицій комплексно вирішити задачу системного синтезу САУ за багатьма критеріями. Розроблено модель оцінки і вибору програмного забезпечення для імітаційного моделювання функціонування як усього технологічного процесу виробництва електронних компонентів РЕА, так і окремо кожного її блоку, що дасть можливість підвищити ефективність процесу моделювання шляхом створення всіх елементів ТП, взаємозв'язків між ними і алгоритму роботи САУ.

Сучасне приладобудування розвивається в напрямку автоматизації виробництва з широким використанням САУ, впровадження гнучких технологій дозволяє швидко і ефективно перебудовувати технологічні процеси на виготовлення нових виробів.

Застосування САУ дозволяє значно підвищити продуктивність обладнання, гнучкість виробництва, скоротити чисельність робітників, а значить, знизити частку ручної праці і суттєво

підвищити якість і надійність продукції, що випускається. У зв'язку із цим розроблення систем управління для впровадження в наявне неавтоматизоване обладнання і їх застосування під час проектування нових автоматизованих комплексів дозволить підвищити якість продукції, що випускається і знизити економічні витрати, що є актуальним завданням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lutsenko I. Deployed model of extremal system operation for solving optimal management problems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. 5/2(71). P. 61–66. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28592.

2. Lutsenko I. Optimal control of systems engineering. Development of a general structure of the technological conversion subsystem. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 1, Issue 2 (73). P. 43–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36246.

3. Клещов Г.М. Інформаційні конструкторські масиви штампів холодної листової штамповки. *Вісник Інженерної академії України*. 2010. №3. С. 74–77.

4. Калюжний В.Л. Холодне штампування виробу з двома фланцями із листової заготовки шляхом використання операцій витягування, роздачі і осаджування. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво.* 2013. № 2. С. 105–110.

5. Шамарін Ю.Є., Тітов В.А., Носар Є.А. Напрямки модернізації штамувального обладнання. *Journal of Mechanical Engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute».* 2011. № 62. С. 92–94.

6. Калюжний В.Л. Створення інформаційних технологій реалізації інтенсивного пластичного деформування матеріалів та поверхневого зміцнення при виготовленні деталей для забезпечення надійності та довговічності штампів: звіт про НДР (заключ.). *НТУУ «КПІ».* 2010.

7. Мосьпан Д.В. Наумова Е.А., Воронин А.В., Драгобецкий В.В. Корректировка режимов упрочнения пластическим деформированием. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии*. Харьков : НТУ «ХПИ». 2014. № 43(1086). С. 117–122.

8. Невлюдов І.Ш., Токарєва О.В. Автоматичне управління технологічними об'єктами : підручник. Київ : НАУ, 2018. 200 с.

9. Lutsenko I., Fomovskaya E. Identification of target system operations. The practice of determining the optimal control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. № 6(2(78)). P. 30–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.54432.

10. Zhang, S., Zhang C., Han G., Wang Q. Optimal Control Strategy Design Based on Dynamic Programming for a Dual-Motor Coupling-Propulsion System. *The Scientific World Journal*. 2014. Vol. 2014. P. 1–9. DOI: 10.1155/2014/958239/.

11. Lapygin Y., Prokhorov N. Cost Management in the enterprise. Eksmo, 2007. 102 p.

12. Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 2, Issue 2(74). P. 35–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38963.

13. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управлени /. Пер. с англ. Б.И. Копылова. Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.

14. Парк Д., Маккей С. Сбор данных в системах контроля и управления. Москва : Группа ИДТ, 2006. 504 с.

15. Гульков Г.И., Петренко Ю.Н., Раткевич Е.П., Симоненков О.Л. Системы автоматизированного управления електро-приводами. Москва : Новое знание, 2007. 400 с.

16. Парр Э. Программируемые контроллеры. Руководство для инженера. Programmable Controllers: An Engineer's Guide. Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2007. 520 с.

17. Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR микрокон-троллеров. Messen, Steuem und Regeln mit AVR-Mikrocontrollem. Москва : МК-Пресс, 2006. 208 с.

Information about authors:

Mospan D. V.,
Candidate of Engineering Science, Associate Professor,
Associate Professor of Department of Electronic Devices
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

Fomovskaya O. V.,
Candidate of Engineering Science, Associate Professor,
Head of Department of Electronic Devices
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.13

DISCRETE-PULSED ENERGY INPUT (DPIE) IS A PERSPECTIVE WAY TO DEVELOP RESOURCE AND ENERGY SAVING TECHNOLOGIES IN THE FOOD INDUSTRY

Obodovych O. M., Sydorenko V. V.

INTRODUCTION

According to the International Standard Industrial Classification of All Economic Activities (ISIC), food production is classified in the manufacturing industry, with its own divisions, which include food production, beverage and tobacco production; in the food production subdivision, 13 sectors are identified, including dairy, butter and fat, starch, bakery, sugar, macaroni, ready-to-eat food, livestock feed production.

The production of beverages covers the production of soft drinks and mineral water, the production of alcoholic beverages obtained mainly through fermentation, beer, and wine, the production of distilled alcoholic beverages.

All the diversity of food processing technologies is related to the implementation of processes, which can be divided into four main groups: mechanical, hydromechanical, thermal, mass transfer. A large and promising section of technology – biotechnology – is currently under development[1].

The basic processes in food technology include mixing, homogenization, dispersion, emulsification, heating. One of the priority areas for technology advancement in the food industry is the effective combination of multiple processes and the intensification of these processes over time and by degree of impact.

One of the methods that allow to successfully solve the problem of intensification of these processes is the method of discrete – pulsed

[1] Иванец В.Н., Бакин И.А., Ратников С.А. Процессы и аппараты пищевых производств : учебное пособие. / Кемеровский технологический институт пищевой промышленности.Кемерово, 2004. 180 с.

energy input (DPIE), developed at the Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine[2].

The method is implemented in several types of equipment, the most common of which is the rotor-pulsating apparatus (RPA), or high shear mixer (HSM), high shear reactor (HSR), rotor-stator mixer, or high shear homogenizer in English literature. The RPA usually consists of coaxial stator (-s) located in the housing, and a rotor (-s) in the form of shells with rectangular holes cut through them[3].

In the food industry, a common application of high-shear mixers is to create emulsions of both high and low viscosity (salad dressings, sauces, curd fruits and dairy desserts, mashed potatoes, sauces, creams). In these products, high-shear mixing also helps disperse thickeners. High shear mixing is also employed to disperse artificial sweeteners and clouding agents in fizzy drinks. High-shear mixers are utilized both for processing of single and multiphase systems. In single phase systems they are very efficient in blending miscible liquids of very different viscosities (e.g., corn syrup and water); in multiphase systems they are used to emulsify immiscible liquids (e.g., mayonnaise, sauces), to deagglomerate and uniformly disperse (nano) particles in liquids (e.g., salt and sugar in water, corn flour in water), and also to suspend fine air bubbles (e.g., ice cream)[4].

In past years, the DPIE method was used in the technology of production of condensed milk[5], for the intensification of the production of glucose-fructose syrups[6], homogenized soybean paste preparation for

---

[2] Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей /под общей ред. А.А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. Київ : Академпериодика, 2015. 464 с.

[3] Накорчевский А.И., Басок Б.И., Рыжкова Т.С. Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов. *Инженерно-физический журнал*. 2002. Т. 75, № 2. С. 58–68.

[4] Rodgers T. High-Shear Mixing: Applications in the Food Industry / T. Rodgers, L. Trinh. *Elsevier BV*. 2016. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03095-X.

[5] Басок Б.И. Интенсификация технологии производства сгущенного молока с сахаром посредством роторно-пульсационных аппаратов / Б. И. Басок, А. Н. Ободович, М. П. Мартыненко, А. Р. Коба, О. А. Горячев. *Пром. теплотехника*. 2005. 27, № 1. С. 38–41.

[6] Ободович А.Н. Интенсификация производства глюкозо-фруктозных сиропов за счет механохимической деструкции / А.Н. Ободович, М.А. Хибина, Л.А. Боряк, А.А. Ободович, А.И. Тесля. *Промышленная теплотехника*. 2006. Т. 28, № 3. С. 44-49.

baby food developed and implemented on the basis of the method[7,8,9], etc.

1. Application of the DPIE method in technologies for processing starch-containing raw materials

One of the most important types of food raw materials is cereal grains. Cereal grain is the raw material for a number of food industries, and its pre-treatment to release starch and other nutrients is necessary.

Studies of the influence the DPIE method on processing starchy raw materials were carried out to determine the dependence of its quality of processing on the following factors:

– physical factors (angular speed of rotation of the rotor, velocity of the flow of medium, the gap between the rotor and the stator, the frequency of flow pulsations , the number of processing cycles) on the average surface size of the particles:

– influence of thermal effects on its dispersion.

The studies were carried out on an experimental setup, the appearance of which is presented in Fig. 1.

In the first stage of the experiments, the angular rotational speed of the rotor and the number of processing cycles were changed. The angular speed of rotation of the rotor was changed by means of a frequency converter. Table 1 shows the dependence of the change of the average surface particle size on the angular speed of rotation of the rotor and the number of processing cycles of the water/grain mixture. The gap between the stator and the rotor was 500 microns.

These data suggest that with increasing number of processing cycles and angular speed, the surface average particle size of the processed grain raw materials decreases.

---

[7] Басок Б.И. Дисперсный анализ соевой пасты, полученной при роторно-пульсационной гомогенизации/ Б.И. Басок, И.А. Пироженко, Д.В. Булавка. *Пром. теплотехника*. 2003. Т. 25, № 4. С. 88–92.

[8] Грищенко А.В., Терлецкая Я.Т., Шаркова Н.А., Жукотский Э.К. Разработка высокобелковых композиций на соевой основе для лечебно-профилактического питания / А.В. Грищенко, Я.Т. Терлецкая, Н.А. Шаркова, Є.К. Жукотский. Пром. теплотехника. 2003. Т. 25, № 4. С. 115–116.

[9] Шаркова Н.О. Особливості технології виробництва соєвих продуктів / Н.О. Шаркова, Е.К. Жукотський, Г.В. Грищенко. *Пром. теплотехника*. 2004. Т. 26, № 6. С. 93–96.

a) b)

Fig. 1. Experimental setup to determine the effect of the processing of starchy raw materials by the DPIE method on its quality properties. a) view of the setup; b) the rotor-stator assembly

Table 1

The dependence of the surface average particle size of grain raw materials on the angular speed and the number of processing cycles

Sample	Number of cycles	Angular speed, s^{-1}.	Surface average particle size, µm.
1	3	180	700
2	5		570
3	10		500
4	20		420
5	30		350
1	3	300	660
2	5		510
3	10		400
4	20		310
5	30		260
1	3	420	640
2	5		480
3	10		390
4	20		280
5	30		220

In subsequent studies, the effect of the gap thickness between the stator and the rotor on the dispersion process was studied. The angular speed was unchanged at 300 s^{-1}.

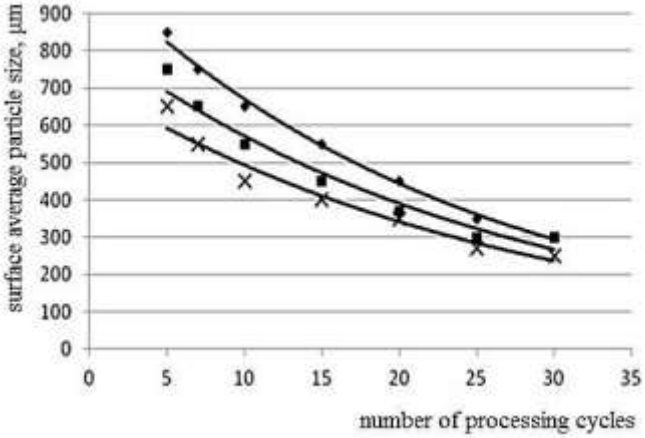


Fig. 2. Dependence of the surface average particle size of the grain raw material on the thickness of the gap and the number of processing cycles. : ♦ - 300 µm ; ■ – 500 µm; x - 700 µm

The curves shown in Fig. 2, indicate that as the gap between the stator and rotor decreases and the number of processing cycles increases, the surface average particle size decreases.

The dispersion is influenced by the amount of solid phase in the processed medium[10]. Experiments were conducted to determine the effect of the solid phase content on the average surface particle size. The solids content of the mixture was 10, 30, 50% by weight of the water/grain mixture. The studies were carried out at an angular speed of rotation of the rotor 300 s^{-1}, the gap between the rotor and the stator 500 µm, a frequency of flow pulsation of 3 kHz. The data of the experiments are presented in Fig. 3.

[10] Долинский А.А., Басок Б.И. Роторно-импульсный аппарат. 2. Локальный импульсный нагрев жидкости. *Промышленная теплотехника.* 1999. Т. 21, № 1. С. 3–5.

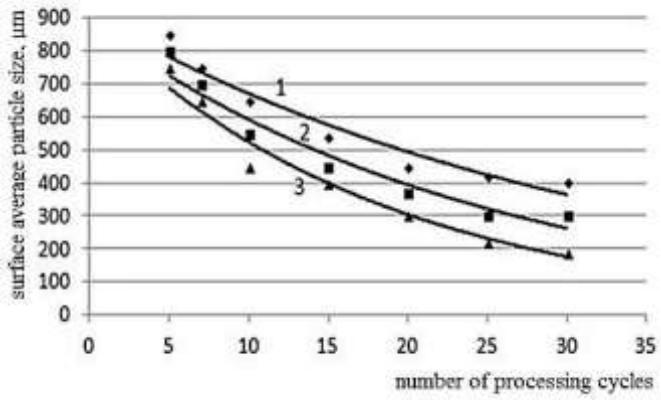


Fig. 3. The dependence of the surface average particle size of the grain raw material on the amount of solid phase and processing cycles

The graph shows that with the increase in the amount of solid phase and processing cycles, the surface average particle size decreases. It is most effective to process grain raw materials with a solids content of 50%. However, after 20 processing cycles, all particles have a surface average size of less than 300 microns. This is because in the processing of the mixture shock loads occur not only due to the contact of solids with the working surfaces of the RPA, but also with each other. The more solid phase in the mixture, the greater the shock load of the particles among themselves.

It is known that in a number of technologies related to grain processing, it is pre-soaked[11].

In the process of grain soaking, the aim of changing the structure of the protein, which binds starch grains, weakens the bonds of starch grains, converts the grain shell from semi-permeable to fully penetrated, is achieved[12]. Soaking grains is one way of softening them. The grain in the water absorbs moisture and increases in volume; the hydration of cellulose membranes increases their elasticity. Water creates layers

[11] Мальцев П.М. Технология бродильных производств. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Пищевая промышленность. 1980. 596 с.

[12] Ліпєц А.А. Технологія крохмалю та крохмалепродуктів: навч. посібник. Київ : НУХТ, 2003. 168 с.

between the constituent parts of the grain that exhibit lubricating and propping effects, which significantly weakens the bonds between the membranes, the embryo and the endosperm. In the experiments, the grain was soaked at 40–48°C for 24–48 hours to moisture of 35–45%.

It is determined that during soaking, 5–7% of soluble grain substances pass into the solution. Therefore, when processing the water/grain mixture in the RPA, used water, which had previously been soaked grain.

Limiting the temperature of soaking to 48ºC is associated with the possible start of grain starch gelatinization.

Soaked grain with a moisture content of 35–45% was processed together with the water in the RPA to an average particle diameter of 300 μm. At the same time, a study was conducted on the treatment of a water/grain mixture in RPA with not soaked grain.

The dependence of the change in the average particle diameter of the water-grain mixture on the number of treatment cycles and moisture is presented in Fig. 4.

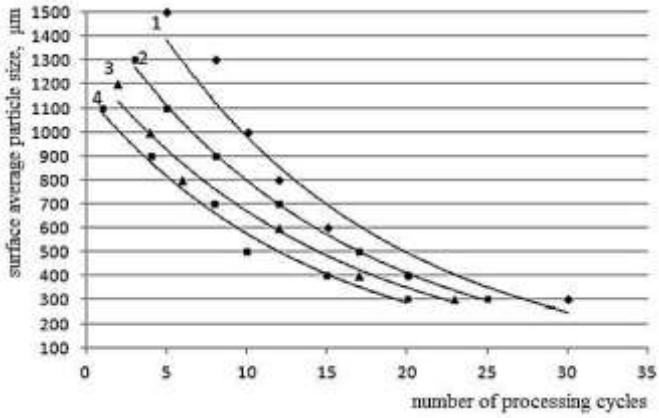


Fig. 4. Dependence of change of the surface average particle size, μm of the water/grain mixture on the number of processing cycles and grain moisture: 1 - 12%; 2 - 35%; 3 - 40%; 4 - 45%

Curve 1 in Fig. 4 corresponds to the processing of a mixture of not soaked grain with a moisture content of 12% with water. Curves 3, 4, 5 correspond to the processing of grain soaked to moisture of 35, 40 and

45% respectively. It is found that the increase in grain moisture because of soaking allows reducing the number of processing cycles from 30 to 20–23 to achieve an average particle diameter of 300 μm.

In subsequent studies, the influence of moisture of soaked and not soaked grain on temperature change during processing in RPA was determined (Fig. 5).

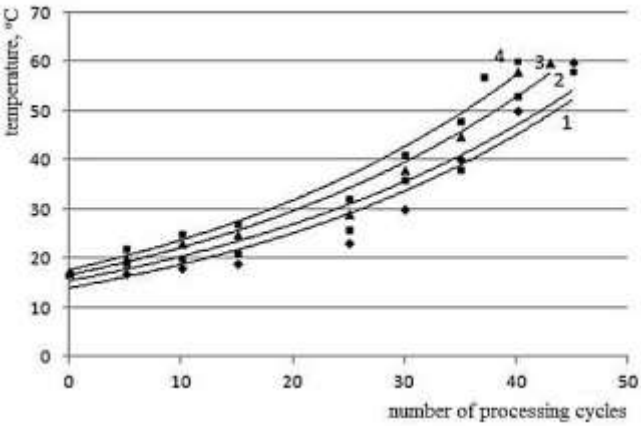


Fig. 5 The dependence of the temperature of the water/grain mixture on the number of cycles with grain moisture: 1–12%; 2–35%; 3–40%; 4–45%

This figure shows that the general tendency of all curves is to increase the temperature of the mixture with increasing number of processing cycles. From 5 to 25 cycles of treatment, the temperature of the mixture rises much less than 25 and above. This is because in the initial processing period the dispersion is not very large. With the increase in the number of processing cycles over 25, the particle size becomes 300-500 microns.

With this particle size and temperature of 30–35°C, the s starch gelatinization begins, which extremely increases the viscosity of the medium. With increasing viscosity, the dissipation energy increases and, as a consequence, the temperature increases. The higher the moisture content of the grain, the more swollen it becomes, the intermolecular bonds weaken and the dispersion process is faster. Consequently, the starch is faster gelatinized and the temperature rises faster. With

increasing grain moisture from 12 to 45% at 30 treatment cycles, the temperature rises from 30 to 40°C.

According to the results of the experiments, it can be concluded that pre-soaking the grain for 48 hours with water at a temperature of 45°C, has a positive effect on its further processing in RPA.

The duration of dispersion is reduced by 20–25%, the temperature of the mixture is increased by 1.2–1.3 times faster and the power consumption of RPA is reduced by 15–20%.

Reducing the number of processing cycles leads to a reduction in the duration of the dispersion process and a reduction in energy costs[13].

Research results have improved the technology of preparation of wort of alcohol production[14].

Adding to the process the rotor-pulsating apparatus allowed to reduce energy consumption by 30% in the process of boiling, to reduce the duration of the process twice, to reduce the loss of fermentable substances from 8… 10% to 2… 4%, to increase the yield of alcohol by a unit of raw material by 1.5 … 3.0%.

The dispersion of starchy raw materials and their boiling are also steps in the production of liquid feed for cattle, in particular pigs. The main part of the compound feed is cereals, because they contain in such large quantities the following vital elements: carbohydrates, minerals, vitamins. Improvement of the technology of preparation of liquid feeds by the use of RPA as a disperser-mixer of water-grain mixture has led to significant economic effect[15,16].

---

[13] Ободович А.Н., Лымарь. А.Ю. Особенности переработки влажного зерна в роторно-пульсационном аппарате (РПА). *Енергетика та автоматика*, 1999. № 3. С. 119–123.

[14] Ободович А.Н. Совершенствование технологии приготовления сусла из крахмалосодержащего сырья в спиртовом производстве с применением дискретно – импульсного ввода энергии / А.Н. Ободович, Т.Л. Грабова, А.Р. Коба, О.А. Горячев. *Пром. теплотехника*, 2007. т. 29, № 4. С. 59–63.

[15] Ободович А.Н. Совершенствование технологии приготовления комбикормов для сельскохозяйственных животных с применением метода дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ) / А.Н. Ободович, А.Ю. Лымарь, В.В. Сидоренко, И.Н. Миронец, А.С. Бачинский. *Науковий вісник НУБІП* 174, 2012. С. 148–153.

[16] Ободович А.Н. Использование дискретно-импульсного метода ввода энергии (ДИВЭ) для интенсификации приготовления жидких кормов для сельскохозяйственных животных на основе барды / Ободович А.Н., Сидоренко В.В., Лымарь А.Ю., Миронец И.Н. Вібрації в техніці та технологіях. 2013, № 2 (70). С. 190–195.

2. Application of the DPIE method in biotechnology

The high dispersion ability of the rotor-pulsating apparatus has been effectively used in the processes of absorption of poorly soluble gases, primarily due to the creation of a sufficiently high specific surface contact phase[17]. The main mechanism of gas phase dispersion was the crushing of gas bubbles under the action of shear stresses in the gap between the rotor and the stator[18].

The dissolution of oxygen, which is also a poorly soluble gas, in the culture fluid underlies the technology of growing baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae*.

The rate of dissolution of oxygen for tubular and box bubbling air distribution systems at an air flow rate of 100 m^3 per 1 m^3 of aerated medium per hour is about 1.4–1.6 kg / m^3 · h. Given that the rate of its absorption of yeast is 1.5–2 kg / m^3 · h, it can be concluded, that the process of gas distribution in the aerators is one of the inhibiting factors in the technology of cultivation of yeast, and the improvement of the air distribution system is relevant.

To study the process patterns of oxygen absorption in the culture fluid using the DPIE method in the process of deep cultivation of aerobic microorganisms a setup (fermenter) was designed shown in Fig. 6a. The RPA was the aerator-mixer, the rotor-stator assembly of which is shown in Fig. 6b. In order to ensure the conditions of the cultivation process, the system provided an air supply system to the culture fluid. The optimal temperature regime in the fermenter was ensured by the circulation of the coolant in the heat exchange jacket. The variation parameters were the speed of rotation of the rotor assembly and the thickness of the gap between rotor and stator, and the associated parameter, the shear flow rate.

The *Saccharomyces cerevisiae* yeast nutrient medium is typically a water/grain mixture (wort) with nitrogen and phosphorus nutrition. Molasses, a by-product of sugar production, is an alternative nutrient medium for cultivation of *Saccharomyces cerevisiae*. Molasses with a solids content of 3 to 10% were used in the studies.

---

[17] Долинский А.А. Энергосберегающие абсорбционные технологии в производстве газированных напитков/ А.А. Долинский, Б.И. Басок, О.К. Шетанков, А. И. Чайка. *Пром. теплотехника.* 2001. Т. 23, № 4–5. С. 137–140.

[18] Корнюшенко Д.А. Адсорбция диоксида углерода водой при импульсном высокоэнергетическом воздействии / Д.А. Корнюшенко, В.И. Блиничев, Т.И. Бондарева. *Изв. ВУЗов, Химия и химическая технология.* 2003. Т. 46, Вып. 5.

In Fig. 7 shows the dependence of the concentration of dissolved oxygen in the wort on the number of cycles of treatment, at a speed of rotation of the rotor assembly 47.75 rpm. The volume of liquid was 60 l, the period of one cycle – 40 sec.

Analyzing the curves of Figs. 7 it can be determined that with increasing concentration of solids in the nutrient medium, the solubility of oxygen decreases. However, given that the equilibrium concentration of dissolved oxygen in molasses solutions is much lower than in water, it is sufficient to process the medium in two cycles to achieve these values.

a)

b)

Fig. 6. Experimental setup (fermenter) to study the patterns of oxygen absorption in the culture fluid using the DPIE method in the process of deep cultivation of aerobic microorganisms: a) appearance; b) the rotor stator assembly

Studies to determine the technological parameters of cultivation were carried out with an initial concentration of yeast 20 g / l. The volume of the culture fluid was 60 liters. Yeast was cultivated for 8 h. The variation parameter was the shear flow rate.

Figure 8 shows the dynamics of the accumulation of yeast mass during the cultivation period at a shear flow rate of 114 10^3 s^{-1}, which was optimal in this series of studies.

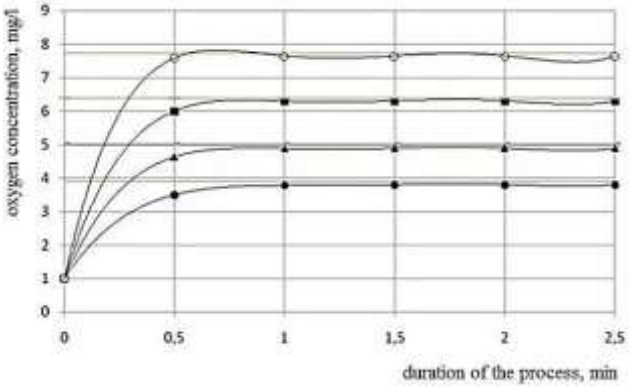


Fig. 7. Dependence of dissolved oxygen concentration on the number of processing cycles at dry matter concentration: ○ – water; ■ – 3%; ▲ – 5%; ● – 10%. (rotation speed of the rotary assembly 47,75 rpm, the number of holes – 60, the cylinder gap – 150 microns)

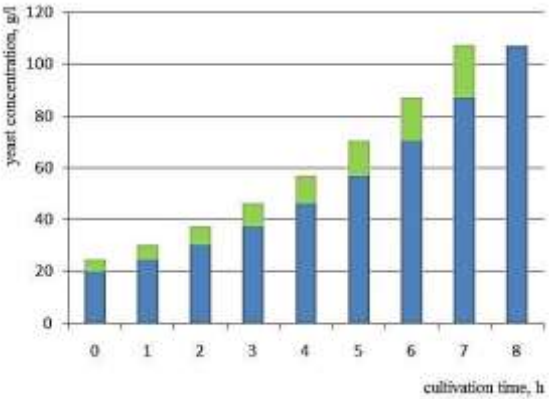


Fig. 8. Dynamics of yeast accumulation at the shear flow rate of 114 10^3 s^{-1}

On the basis of the obtained data, the values of the specific rates of growth of the yeast with a solids content of 3 to 10% were calculated.

The results of the calculations are presented in Fig. 9. It is found that with increasing flow shear rate, the specific rate of growth of yeast increases. Its maximum value is reached at a flow rate of $114 \cdot 10^3$ s^{-1}. With the further increase of the shear flow rate, the specific growth rate decreases. As the solids content in the culture fluid decreases, the specific rate increases, which is explained by the higher solubility of oxygen in less concentrated media.

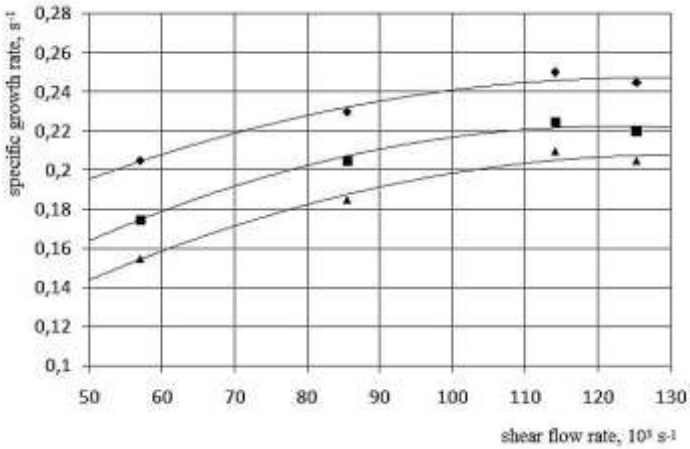


Fig. 9. Dependence of specific growth rate of yeast on the shear flow rate at the dry matter concentration in the nutrient medium: ▲ – 10%; ■ – 5%; ♦ - 3%

On the basis of the data obtained on the accumulation of yeast biomass at the last stage of cultivation, the rate of oxygen transfer in the culture fluids was determined. In determining the effect of DIVE mechanisms on the mass transfer rate, an important factor is the gap between rotor and stator, the effect of which takes into account such an indicator as the shear flow rate, which is defined as the ratio of the velocity of the medium flow in the radial direction to the thickness of the gap between rotor and stator.

Data showing the dependence of the oxygen mass transfer rate on the shear flow rate at different solids content in the culture fluid are presented in Fig. 10.

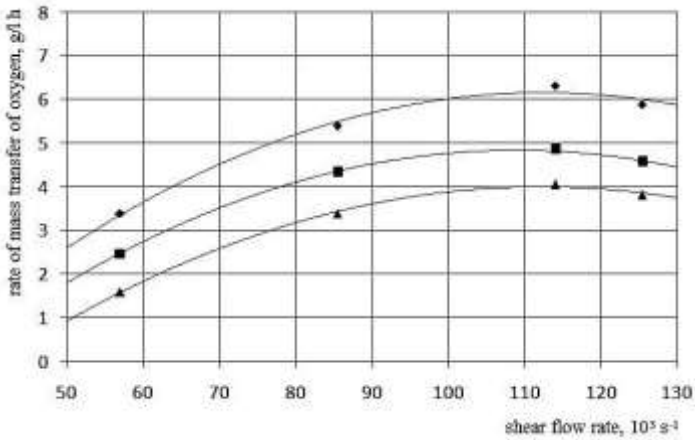


Fig. 10. Dependence of oxygen mass transfer rate on shear flow rate at dry matter concentration: ▲ – 10%; ■ – 5%; ♦ - 3%

It is determined that with increasing flow shear rate, the oxygen transfer rate increases. The optimal range of values of the flow shear rate is in the range 90 - 114 · 10^3 s^{-1}. It has also been found that the rate of mass transfer decreases with increasing solids content in the medium.

Analysis of the results of the studies suggests that increasing the shear rate to 114 · 10^3 s^{-1} intensifies the value of the specific rate of growth of yeast at different concentrations of solids in the medium. With an increase in the shear flow rate of more than 114 · 10^3 s^{-1}, the specific rate of yeast growth decreases. There may be several factors behind this.

The first is that the increase in the rate of mass transfer promotes faster and more complete entry of nutrients into the yeast cell, which may exceed the amount required for their vital activity. In this regard, cell growth is slowed or stopped altogether. Excess oxygen and nutrients in the yeast cell can lead to its death.

Another factor is that in order to achieve a high rate of dissolution of oxygen, “rigid” conditions for the processing of the medium in the RPA, i.e. high angular speeds of rotation of the rotors, pulsation frequencies, shear flow rates, are required. At the same time, high shear stresses are formed in the gap between rotor and stator, which can lead to the destruction of the cell wall.

In order to test these assumptions, the effect of flow shear rate on the physiological state of yeast cells was studied. The results of the studies are shown in table 2.

Table 2

The dependence of the number of damaged cells (million cells) on the shear flow rate in the RPA

Shear flow rate, 10^3 s^{-1}	**duration of processing, h**								
	0	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
85,46	2	2	2	2	3	3	4	4	4
114	2	2	2	3	3	4	4	4	5
125,4	2	3	3	5	5	6	6	9	10
bubbling	2	2	2	2	2	2	2	3	3

It is found that with increasing flow shear rate from 85.46 to 125.4 the number of dead cells increases.

CONCLUSIONS

The method of discrete-pulsed energy input, as a method that intensifies the processes of heat and mass transfer in two or multicomponent gas-liquid, liquid-solid systems, has been widely used in various industries, in particular the food industry. The application of the DPIE method allows reducing energy costs for the processes of mixing, homogenization, dispersion, emulsification, heating, the duration of these processes, and the amount of equipment.

SUMMARY

The section presents the results of applying the method of discrete pulsed energy input (DPIE) in food technology. Examples of the use of the method and rotor-pulsating apparatuses in which it is implemented in several technologies are considered. The results of the application of the DPIE method in the technologies for processing starch-containing raw materials are presented. The influence of the ratio of water to grain, the number of processing cycles, the angular speed of the rotor, the thickness of the gap between the rotor and the stator on the degree of dispersion of the grain is considered. The effect of preliminary soaking of grain on the efficiency of its processing in a rotor-pulsating apparatus is considered. It has been determined that the optimal processing regime is the following: the ratio of grain to water is 1: 2, the rotor angular speed is 300, the

thickness of the gap is 500 μm, the number of processing cycles is 20. The research data on the cultivation of Saccharomyces cerevisiae yeast using rotor- pulsating apparatus as an aerator-mixer are presented. It was found that the maximum specific growth rate of yeast, equal to 0.25 s^{-1} during cultivation for 8 hours, is achieved at a shear flow rate of $114 \cdot 10^3$ s^{-1}.

REFERENCES

1. Иванец В.Н., Бакин И.А., Ратников С.А. Процессы и аппараты пищевых производств: Учебное пособие. Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. Кемерово, 2004. 180 с.
2. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей / под общей ред. А.А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. Київ : Академпериодика, 2015. 464 с.
3. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Рыжкова Т.С. Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов. *Инженерно-физический журнал*. 2002. Т. 75, № 2. С. 58–68.
4. Rodgers T. High-Shear Mixing: Applications in the Food Industry / T. Rodgers, L. Trinh. *Elsevier BV*. 2016. URL: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03095-X.
5. Басок Б.И. Интенсификация технологии производства сгущенного молока с сахаром посредством роторно-пульсационных аппаратов / Б.И. Басок, А.Н. Ободович, М.П. Мартыненко, А.Р. Коба, О.А. Горячев. *Пром. теплотехника*. 2005. 27, № 1. С. 38–41.
6. Ободович А.Н. Интенсификация производства глюкозо-фруктозных сиропов за счет механохимической деструкции / А.Н. Ободович, М.А. Хибина, Л.А. Боряк, А.А. Ободович, А.И. Тесля. *Промышленная теплотехника*. 2006. Т. 28, № 3. С. 44–49.
7. Басок Б.И. Дисперсный анализ соевой пасты, полученной при роторно-пульсационной гомогенизации / Б.И. Басок, И.А. Пироженко, Д.В. Булавка. Пром. теплотехника. 2003. Т. 25, № 4. С. 88–92.
8. Грищенко А.В., Терлецкая Я.Т., Шаркова Н.А., Жукотский Э.К. Разработка высокобелковых композиций на соевой основе для лечебно-профилактического питания / А.В. Грищенко, Я.Т. Терлецкая,

Н.А. Шаркова, Є.К. Жукотский. *Пром. теплотехника*. 2003. Т. 25, № 4. С. 115–116.

9. Шаркова Н.О. Особливості технології виробництва соєвих продуктів / Н.О. Шаркова, Е.К. Жукотський, Г.В. Грищенко. *Пром. теплотехника.* 2004. Т. 26, № 6. С. 93–96.

10. Долинский А.А., Басок Б.И. Роторно-импульсный аппарат. 2. Локальный импульсный нагрев жидкости. *Промышленная теплотехника.* 1999. Т. 21, № 1. С. 3–5.

11. Мальцев П.М. Технология бродильных производств. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Пищевая промышленность. 1980. 596 с.

12. Ліпєц А.А. Технологія крохмалю та крохмалепродуктів: навч. посібник. Київ : НУХТ, 2003. 168 с.

13. Ободович А.Н., Лымарь А.Ю. Особенности переработки влажного зерна в роторно-пульсационном аппарате (РПА). *Енергетика та автоматика*, 1999. № 3. С. 119–123.

14. Ободович А.Н. Совершенствование технологии приготовления сусла из крахмалосодержащего сырья в спиртовом производстве с применением дискретно-импульсного ввода энергии / А.Н. Ободович, Т.Л. Грабова, А.Р. Коба, О.А. Горячев. *Пром. теплотехника*, 2007. т. 29, № 4. С. 59–63.

15. Ободович А.Н. Совершенствование технологии приготовления комбикормов для сельскохозяйственных животных с применением метода дискретно-импульсного ввода энергии (ДИВЭ). А.Н. Ободович, А.Ю. Лымарь, В.В. Сидоренко, И.Н. Миронец, А.С. Бачинский. *Науковий вісник НУБІП.* 174, 2012 с. 148–153.

16. Ободович А.Н. Использование дискретно-импульсного метода ввода энергии (ДИВЭ) для интенсификации приготовления жидких кормов для сельськохозяйственных животных на основе барды / Ободович А.Н., Сидоренко В.В., Лымарь А.Ю., Миронец И.Н. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2013, № 2 (70). С. 190–195.

17. Долинский А.А. Энергосберегающие абсорбционные технологии в производстве газированных напитков / А.А. Долинский, Б.И. Басок, О.К. Шетанков, А.И. Чайка. *Пром. теплотехника.* 2001. Т. 23, № 4–5. С. 137–140.

18. Корнюшенко Д.А. Адсорбция диоксида углерода водой при импульсном высокоэнергетическом воздействии / Д.А. Корнюшенко, В.И. Блиничев, Т.И. Бондарева. Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. 2003. Т. 46, вып. 5.

Information about the authors:
Obodovych O. M.,
Doctor of Engineering Science, Senior Researcher,
Chief Researcher of Department Thermophysics
of Pulsed Processes in Disperse Systems
Institute of Engineering Thermophysics
of National Academy of Sciences of Ukraine
2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) str., Kyiv, 03057, Ukraine

Sydorenko V. V.,
Candidate of Engineering Science,
Senior Researcher of Department Thermophysics
of pulsed Processes in Disperse Systems
Institute of Engineering Thermophysics
of National Academy of Sciences of Ukraine
2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.14

МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОНІКИ З РІЗНОЮ АРХІТЕКТУРОЮ

Однодворець Л. В., Проценко І. Ю.

ВСТУП

Широке використання плівкових матеріалів у мікроелектроніці, спінтроніці і сенсорній техніці постійно стимулює дослідження їхніх фізичних властивостей та вивчення температурних і концентраційних ефектів у електрофізичних та магніторезистивних властивостях, оскільки в таких системах можуть стабілізуватися гранульовані й упорядковані тверді розчини (т. р.) та інтерметалідні фази, формуватися магнітні інтерфейс[1,2]. Під впливом температури і зовнішнього магнітного поля проявляються особливості взаємодії носіїв заряду з межами поділу, магнітними моментами атомів, гранул і доменів та фононами. Встановлення особливостей впливу різних факторів на фізичні властивості багатошарових, гранульованих і багатокомпонентних, у т.ч. високоентропійних, плівкових матеріалів необхідне для створення елементів сенсорної електроніки, оптоелектроніка і спінтроніки[3,4,5]. Дуже важливим є вивчення особливостей формування структурно-фазового складу плівок

---

[1] Campbell I.A., Fert A. Transport properties of ferromagnets. Ferromagnetic Materials. Edited by E.P.Wohlfarth. 1982. V.3. P .747–800.

[2] Grunberg P., Schreiber R., Pang Y.,. Brodsky M.B, Sowers H. Layered magnetic structures: evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr interlayers. Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57, № 19. P. 2442–2445. DOI 10.1103/PhysRevLett.57.2442

[3] Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники. *Успехи физики металлов*. 2008. Т. 172, № 12. С. 1336–1348.

[4] Berkowitz A. E., Mitchell J.R. , Carey M. J., Young A.P., Zhang S., Spada F.E., Parker F.T., Hutten A., Thomas G. Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys. Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68, № 25. P. 3745–3748. DOI 10.1103/PhysRevLett.68.3745.

[5] Грюнберг П.А. От спиновых волн к гигантскому магнитосопротивлению и далее. *Успехи физики металлов*. 2008. Т. 172, № 12. С. 1349–1358.

в умовах термообробки, впливу магнітного поля[6,7]. Зауважимо, що мультишари, гранульовані плівкові матеріали і високоентропійних сплавів (ВЕС) належать до систем, у яких спін–залежне розсіювання електронів (СЗРЕ) провідності реалізується в ефект гігантського магнітоопору (ГМО). Перехід до магніторезистивних структур відбувається, коли домінує внесок у величину МО дає СЗРЕ на інтерфейсах або на магнітних гранулах систем на основі магнітних і немагнітних металів порівняно з розсіюванням електронів на магнітних моментах доменів або їхніх стінках.

Розроблений близько десяти років тому новий клас металевих т.р., т. зв. ВЕС, є унікальним класом багатокомпонентних матеріалів[8,9,10]. ВЕС містять не менш 5 основних металевих елементів, атомний відсоток кожного з яких складає від 5 до 35%. В отриманих сплавах відбувається формування однофазного стабільного твердого розчину заміщення (переважно ГЦК- або ОЦК-гратки), який є одночасно високоміцним і термодинамічно стійким. Причина цього – висока ентропія змішування, яка забезпечує стабілізацію утворення твердого розчину й запобігає формування інтерметалідних фаз у процесі кристалізації[11]. Властивості ВЕС значною мірою визначаються впливом процесів, які не завжди притаманні традиційним багатоелементним сплавам, а саме: вплив ентропії змішування; вплив викривлення кристалічної гратки сформованого твердого розчину; вплив уповільненої дифузії

---

[6] Tiwari A. Effect of addition of Ni on the structure and giant magnetoresistance in Fe–Cu films. Physica B: Condens. Matter. 2007. V. 387. P. 63–68. DOI 10.1016/j.physb.2006.03.029.

[7] Hiep V.V. , Chau N. , Hong D.M. , Luong N. H. High coercivity and giant magnetoresistance of CoAg, CoCu granular films. J. Magn. Magn. Mater. 2007. V. 310. P. 2524–2526. DOI 10.1016/j.jmmm.2006.11.136.

[8] Yeh J. W., Chen Y. L., Lin S. J., Chen S. K. High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation. Mater. Sci. Forum. 2007. V. 560. P. 1–9. DOI 10.4028/ www.scientific.net/MSF.560.1

[9] Vorobiov S.I., Kondrakhova D.M., Nepijko S.A., Poduremne D.V., Shumakova N.I., Protsenko I.Yu. Crystalline structure, electrophysical and magnetoresistive properties of high entropy film alloys. J.Nano- Electron. Phys. 2016. V. 8, № 3. P. 03026-1–03026-5. DOI 10.21272/jnep.8(3).03026.

[10] Bereznyak Yu.S., Opielak M., Odnodvorets L.V., Poduremne D.V., Protsenko I.Yu., Shabelnyk Yu.M. Crystalline structure and physical properties of high-entropy film alloys. J. Nano- Electron. Phys. 2019. V.11, № 2. P. 02026-1–02026-6. DOI 10.21272/jnep.11(2).02026

[11] Yeh J.-W. Recent progress in high-entropy alloys. Ann. Chim. Sci. des Matériaux. 2006. V. 31. № 6. P. 633–648. DOI 10.3166/acsm.31.633-648.

та ефект перемішування. Висока температурна стабільність ВЕС забезпечує перспективи їх використання для пасивних елементів інтегральних мікросхем із наперед заданою структурою шарів та значенням робочих параметрів.

1. Методика підготовки зразків та магніторезистивні властивості багатошарових плівкових матеріалів

Особливу увагу дослідників привертають плівкові системи, в яких відбувається утворення необмежених т.р. із можливою подальшою стабілізацією в них гранульованого стану[12]. Це пов'язано із спостережуваним в таких системах явищем ГМО, де переважає спін-залежне розсіювання носіїв електричного струму на гранулах магнітної компоненти, що розташована в немагнітній матриці. Нами вивчалися магніторезистивні властивості двокомпонентних або багатошарових плівкових систем на основі Co, Fe, Cu, Ag, Au та інших металів, які отримувалися в вакуумній камері ($p = 10^{-3}$–10^{-4} Па). Осадження проводилось при температурі 300 К на підкладки (П) із аморфного ситалу або природно оксисленого Si (для магніторезистивних досліджень) та на скол кристалу NaCl, на який попередньо було осаджено плівку вуглецю товщиною приблизно 30 нм (для електронно-мікроскопічних досліджень). Спеціальна система заслінок дає змогу в одному технологічному процесі отримувати як одношарові плівки, так і багатошарові системи, у т.ч. і ВЕС, методами одночасної або пошарової конденсації компонент.

У випадку систем з обмеженою взаємною розчинністю для утворення твердих розчинів застосовувались методи одночасного осадження компонент (Co і Ag) або пошарового осадження надтонких шарів (товщиною $d = 0{,}5$-3 нм). У випадку систем із необмеженою взаємною розчинністю компонент методом послідовної конденсації шарів із наступною термообробкою були одержані гранульовані т.р. Cu (Co), Cu(Fe), Ag(Co), Ag(Fe) та ін. Товщина окремих шарів плівкової системи контролювалася двома методами: у процесі конденсації за допомогою кварцового резонатора, а після осадження – методом оптичної інтерферометрії.

[12] Arana S., Castafto E., Gracia F.J. High temperature circular position sensor based on a giant magnetoresistance nanogranular AgxCo1-x alloy IEEE Sens. J. B. 2004. V. 4. P. 221–225.

Концентрація і-ої компоненти у плівкових матеріалах обраховувалась, виходячи з їх ефективної товщини (d_i):

$$c_i = \frac{\rho_i d_i \mu_i^{-1}}{\sum_{i=1}^{n} \rho_i d_i \mu_i^{-1}},$$

де ρ_i – густина, μ_i – молярна маса відповідного елементу, n – загальне число компонент, а потім уточнювалась методом енерго-дисперсійного аналізу. Відпалювання зразків проводилось в інтервалі температур від 300 до 900 К. Подальші дослідження структурно-фазового стану і проведення електронографічного аналізу проводились за допомогою просвічуючого електронного мікроскопу після охолодження зразків до 300 К.

Дослідження магніторезистивних властивостей проводилося при кімнатній температурі з використанням чотириточкової схеми в зовнішньому магнітному полі від 0 до 600 мТл. При цьому струм був направлений паралельно площині зразка, а вимірювання магнітоопору проводилися у трьох геометріях – поздовжній (лінії магнітної індукції B направлені вздовж напряму протікання струму), поперечній (лінії B направлені перпендикулярно до лінії протікання струму) та перпендикулярній (лінії B перпендикулярні площині зразка). Величина магнітоопору визначалася за співвідношенням МО = $\Delta R/R(0)$ = $(R(\mathrm{B}) - R(0))/R(0)$, де $R(\mathrm{B})$ і $R(0)$ – опір плівки при заданому полі і без поля. Для оцінки анізотропного магнітоопору нами використовувалося співвідношення АМО=$3\Delta R/(R(\mathrm{B})_{\parallel} + 2R(\mathrm{B})_{\perp})$, де $R(\mathrm{B})_{\parallel}$ і $R(\mathrm{B})_{\perp}$ – значення опору плівки при паралельній і перпендикулярній геометрії вимірювання МО.

Магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Fe і Cr або Cu вивчались на прикладі мультишарів $[\mathrm{Fe/Cr}]_n$/П та $[\mathrm{Fe/Cu}]_n$/П, де n = 15 – кількість фрагментів, яка за даними[13] є оптимальною. Для плівкової системи $[\mathrm{Fe/Cu}]_{15\text{-}30}$/П показано, що при загальній товщині системи 70-100 нм спостерігається насичення залежностей $\Delta R/R(0)$ і B_s від загальної товщини. Дані магніторезистивних вимірювань в мультишарах $[\mathrm{Fe/Cr}]_n$/П

[13] Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Vandau F.N., Petroff F., Eitenne P., Creuzet G. , Friederich A., Chazelas J. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. Phys. Rev. Lett. 1988. V.61. P. 2472–2475. DOI 10.1103/PhysRevLett.61.2472.

представлені на рис. 3. Як видно, для двох плівкових систем з атомною концентрацією 45 і 50 ат.% Fe характерна ізотропність польових залежностей R(B), тобто незалежно від геометрії вимірювання спостерігається зменшення величини електроопору в магнітному полі, що є характерною ознакою ГМО. Для інших систем з тонкими (≤ 2 нм) або відносно товстими (4 нм) шарами Cr характерна анізотропія залежностей R(B), подібно до феромагнітних плівок, і переважання величини магнітоопору (МО) в повздовжній геометрії у порівнянні з двома іншими геометріями. Термообробка зразків у широкому інтервалі температур (300 ÷ 900 К) в більшості випадків привела до незначного зростання величини МО у всій трьох геометріях при температурі відпалювання $T_в$ = 500 К і спаданні – при подальшому відпалюванні до 900 К, а також зникненню ознак ГМО в двох зразках при $T_в$ = 900 К. Необхідно відзначити великі значення B_s в системах з ознаками ГМО (> 200 мТл), що характерно для мультишарів із спін-залежним розсіюванням електронів. Особливості гістерезису в цих плівках виражаються в наявності подвійних піків на магніторезистивних петлях (рис. 1 а) і великим значеннями коерцитивності B_c (3,3 ÷ 18,0 мТл), що може пояснюватися перемагнічуванням шарів Fe. У анізотропних зразках на основі фрагменту Fe/Cr спостерігається значне зменшення величини B_s (до 30 ÷ 40 мТл), що істотно впливає на чутливість МО до магнітного поля. Зазвичай величина чутливості S_B у невідпалених зразках становить 0,4 ÷ 3 %/Тл, а для відпалених до 900 К не перевищує 0,9 %/Тл. У мультишарах на основі Fe і Cu[14] (рис. 2) при атомній концентрації c_{Fe} > 50 ат.% спостерігається анізотропія польових залежностей R від B, а, як наслідок, і $\Delta R/R_s$ від B.

Необхідно відзначити, що для величина МО в більшості випадків не перевищує 0,05%. При менших значеннях c_{Fe} анізотропія зникає, а величина МО значно збільшується (для $[Fe(1,6)/Cu(1,7)]_{15}$/П (c_{Fe} = 48 %) $\Delta R/R_s$ = 0,1÷0,2 %), що може свідчити про наявність ГМО в мультишарах на основі фрагмента Fe/Cu.

[14] Кондрахова Д.М., Шабельник Ю.М., Синашенко О.В., Проценко І.Ю. Структурно-фазовий стан, електрофізичні та магнеторезистивні властивості твердих розчинів у плівкових системах на основі Co і Cu або Ag та Fe і Cr або Cu. Успехи физики металлов. 2012. Т. 13, № 3. С. 241–267.

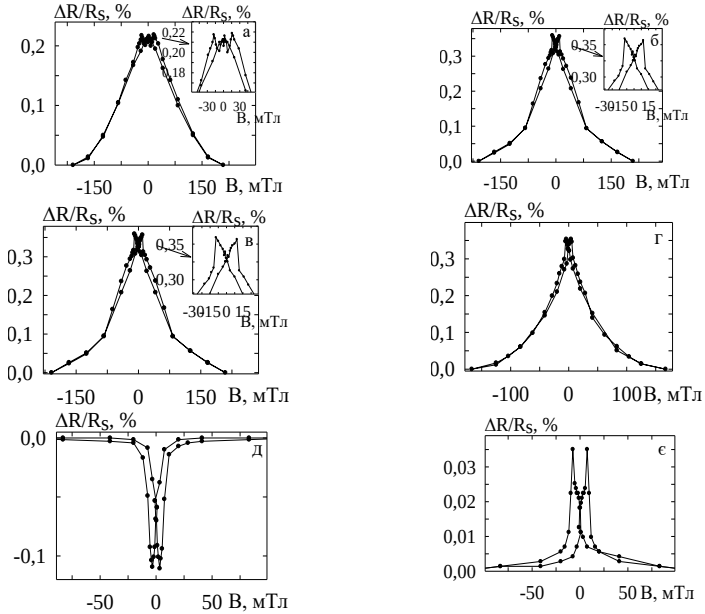


Рис. 1. Залежність МО від індукції магнітного поля для плівкової системи [Fe(2,3)/Cr(2,8)]$_{15}$/П: невідпаленої (а, б) і відпаленої до $T_в$ = 500 (в, г) і 900 К (д, є) в двох геометріях – повздовжній (а, в, д) і поперечній (б, г, є). У дужках вказана товщина в нм

Термообробка зразків до 850 К приводить до незначного зменшення магніторезистивного ефекту в трьох геометріях, а за рахунок переважного зростання поля насичення B_s – до зменшення чутливості S_B. Також необхідно відзначити наявність на магніторезистивних залежностях гістерезису і магнітного насичення при малих полях, що спричиняє досить великі значення чутливості до магнітного поля (в зразках із d_{Cu} =1,7 нм величина S_B досягає 0,6-14 %/Тл). У випадку плівкової системи на основі Co і Cu магніторезистивні властивості досліджувались для тришарових структур Co/Cu/Co/П (рис. 5) із різною концентрацією магнітної компоненти. Характерним для них є відсутність анізотропії МО в залежності від геометрії вимірювання, що, як вже зазначалось, являється ознакою ГМО. Відмітимо, що перехід анізотропний МО → ГМО проходить у випадку, коли домінуючий внесок у величину МО вносить спін-залежне розсіювання електронів провідності на інтерфейсах магнетик/немагнітний метал або магнітних

гранулах у порівнянні із розсіюванням на магнітних моментах доменів та їх стінках. Слід відмітити, що магніторезистивні властивості розглянутих нами плівкових систем Co/Cu/Co/П термостабільні: після відпалювання до $T_в$=700 К спостерігається незначне зменшення величини МО, що також характерно і для величини поля насичення B_s. Водночас термообробка зразків Co(14)/Cu(9)/Co(14)/П (рис. 3) призводить до зменшення магніторезистивного ефекту в перпендикулярній геометрії та його збільшення в інших геометріях, що також притаманно і для індукції B_s магнітного поля (від 140 до 24 мТл – в перпендикулярній, та від 35 до 39 мТл – в повздовжній геометрії). Для залежності МО від концентрації c_{Co} при трьох геометріях вимірювання характерне збільшення значення МО з ростом концентрації атомів Co в системі. Особливо це помітно у випадку поперечної геометрії, в якій при концентрації c_{Co} = 60 ат.% МО становить 0,2%, та при 87 ат.% – 0,4%. Якщо порівнювати значення індукції насичення при різних геометріях, то зазначимо, що для перпендикулярної воно є найбільшим, що пояснюється присутністю в цій геометрії вісі важкого намагнічування.

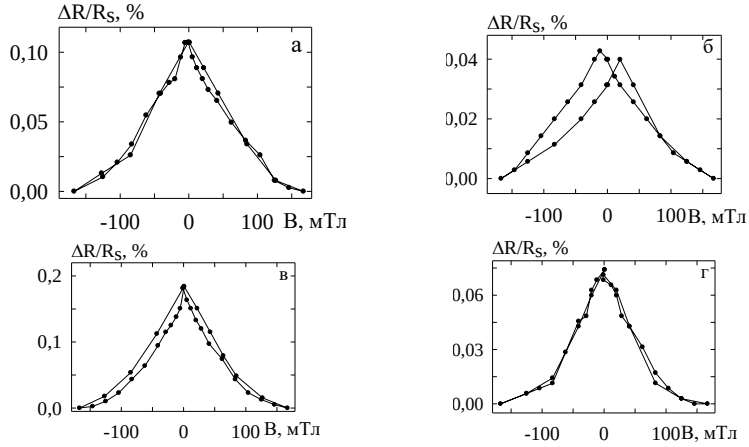


Рис. 2. Залежність МО від індукції магнітного поля для плівкової системи [Fe(1,6)/Cu(1,7)]$_{15}$/П: невідпаленої (а, в) та відпаленої до $T_в$ = 850 К (в, г) у повздовжній (а, б) і поперечній (в, г) геометріях

Досліджувані плівкові системи при значеннях МО = 0,1-0,4 % характеризуються досить великими значеннями величини чутливості до магнітного поля. Найбільше значення S_B зафіксовано для системи Co(14)/Cu(9)/Co(14)/П і складає 22%/Тл в поперечній геометрії.

У випадку зменшення товщини проміжного немагнітного шару Cu від 9 до 6 нм поле коерцитивності зменшується від 200 до 100 мТл, відповідно, значення чутливості магнітного поля при цьому збільшується від 1,2 до 2,8 %/мТл. Із даних результатів витікає, що нижній магнітний шар дає більший внесок у величину МО, і збільшення його товщини призводить до збільшення коерцитивності системи.

2. Магніторезистивні властивості гранульованих плівкових сплавів

Потреби стрімкого розвитку сучасного напряму магнітоелектроніки – спінтроніки виявили цілу низку нових невирішених задач у фізиці плівкового матеріалознавства.

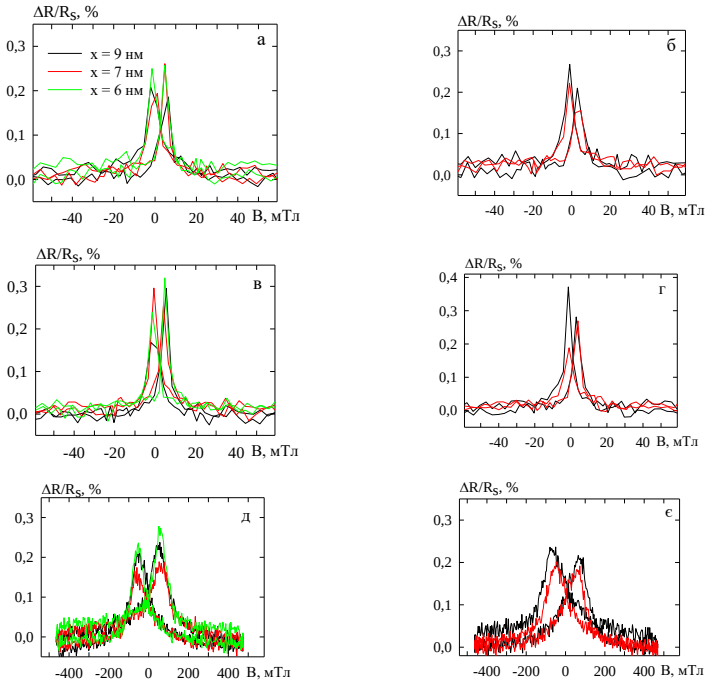


Рис. 3. Залежність МО від індукції магнітного поля для плівкової системи Co(14)/Cu(*x*)/Co(14)/П, невідпаленої (а, в, д) та відпаленої до $T_в$ = 700 К (б, г, є), у поздовжній (а, б), поперечній (в, г) та перпендикулярній (д, є) геометріях вимірювання. *x* = 6, 7, 9 нм

По-перше, оскільки елементи спінтроніки функціонують під дією зовнішніх магнітних полів, виникла потреба в нових швидкодіючих та високоточних датчиках магнітних полів різних діапазонів. По-друге, вже відомі функціональні елементи мають ряд недоліків, що зумовлені їхньою нестабільністю під впливом зовнішніх фізичних полів. Для вирішення цих питань постійно з'являються пропозиції застосування принципово нових магнітних матеріалів, наприклад супермолекулярних, графенових, на основі магнітних напівпровідників, наночастинок і т.д. Процеси спін-залежного розсіювання електронів у приладових структурах спінтроніки протікають у площині меж поділу окремих магнітних і немагнітних шарів. Тому властивості всієї системи залежать від методу її отримання та особливостей формування меж поділу між шарами. Так, відомо, що в мультишарах на основі ультратонких магнітних і немагнітних шарів під час повільної конденсації утворюються супергратки, а застосування швидкого термічного осадження призводить до утворення твердих розчинів в тих же системах.

Двокомпонентні гранульовані сплави можна отримати двома методами. Традиційним став метод одночасної конденсації із двох джерел (Me_1+Me_2/П), якій у роботі був використаний для отримання гранульованих плівкових сплавів. В інший спосіб отримати гранульований стан плівкових зразків можна використовуючи методику пошарової конденсації (Me_2/Me_1/П) з подальшим відпалюванням до різних температур (400 – 900 К), що відбувається з постійною швидкістю нагрівання-охолодження 2 К/хв та ізотермічним відпалюванням при заданій температурі протягом 15 хвилин. Особливо підкреслимо, що за таких методів формування вказаних типів плівкових систем у них можлива реалізація МО, анізотропного магнітоопору (АМО) та ефекту ГМО. Щоб уникати впливу структури підкладки на структуру досліджуваних плівок і, як наслідок цього, наприклад, на її магнітну анізотропію, як підкладки використовувалися пластини кремнію із природним шаром оксиду. У деяких плівкових системах можлива реалізація умов формування гранульованого стану магнітної компоненти[15]. Найбільшу схильність до цього, як показують дослідження, виявили

[15] Koltunowicz T.N., Bondariev V., Odnodvorets L.V., Protsenko S.I., Shumakova M.O., Tkach O.P. Electrophysical properties of granular film alloys. Vacuum. 2019. V. 164. P.165–169. DOI 10.1016/j.vacuum.2019.04.015.

системи на основі Co та Cu і меншою мірою – на основі Co і Au або Ag. На рис. 4 наведена мікроструктура гранульованого т.р. Ag (Co) та відповідна електронограма.

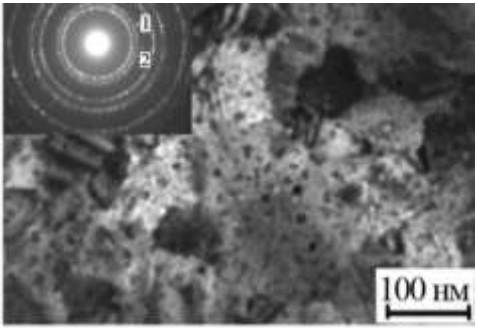


Рис. 4. Мікроструктура та відповідна їй електронограма гранульованого стану т.р. Ag(Co), сформованого на основі двошарової плівкової системи Ag(40)/Co(30)/П. Цифрами 1 і 2 позначені рефлекси від гранул Co

Гранульовані сплави, на відміну від інших структур, не мають у своєму складі структурно суцільних шаруватих утворень магнітної компоненти з доменною структурою. Магнітні гранули в цих сплавах мають широкий діапазон магнітного поля перемагнічування. Тому площа під кривою МО набагато більша, ніж в інших випадках. На рис. 5 представлені залежності МО при поздовжній геометрії вимірювання для плівкових систем Co(10)/Ag(20)/Co(10)/П та Co(6)/Au(15)/Co(5)/П, відпалених до $T_в$ = 800 К, у яких відбулося утворення гранул. Для МО плівкових гранульованих сплавів на основі Ag та Co характерна величина 0,40-0,50% при загальній концентрації c_{Co} = 38 ат.%, а при збільшенні концентрації атомів Co величина МО спочатку зростає майже в три рази (МО =1,5-1,8%; c_{Co} = 60 ат.%), а потім зменшується (МО= 0,4-0,5% при c_{Co} = 70 ат.%) (рис. 5). Термовідпалювання призводить до незначного зростання величини МО при $T_в$ = 800 К та його зменшення при $T_в$ = 900 К у всіх трьох геометріях вимірювання МО. На рис. 6 наведені залежності для МО від індукції зовнішнього магнітного поля свіже сконденсованих та термостабілізованих до 750 К плівок (Fe+Ag)/П із загальною концентрацією c_{Ag} = 70 ат.%.

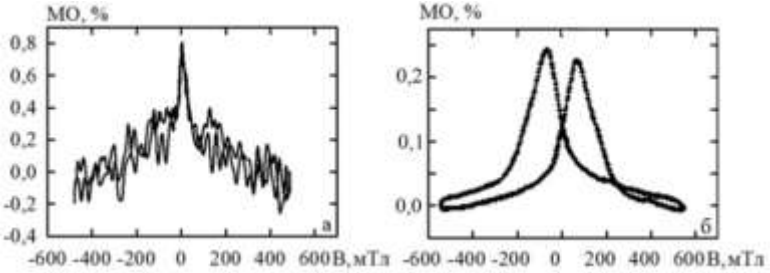


Рис. 5. Залежність МО від індукції магнітного поля при поздовжній геометрії вимірювання для плівкових систем Co(10)/Ag(20)/Co(10)/П (а) та Co(6)/Au(15)/Co(5)/П (б) відпалених до $T_в$ = 800 К

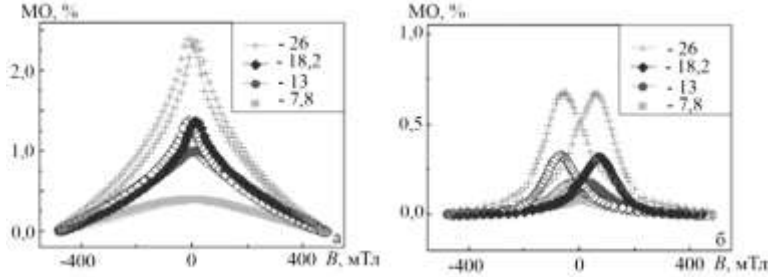


Рис. 6. Залежність МО від індукції зовнішнього магнітного поля для плівкової системи (Fe+Ag)/П при загальній концентрації c_{Ag} = 70 ат.% у невідпаленому (а) та відпаленому до $T_в$ = 750 К (б) станах при поздовжній геометрії вимірювання МО. На вставці вказана загальна товщина в нм

Характерна для гранульованого сплаву залежність МО від зовнішнього магнітного поля спостерігається нами в невідпалених плівкових зразках із досить високими значеннями МО при кімнатній температурі вимірювання. Зменшення величини МО (рис. 6 б) після відпалювання можна пов’язати зі збільшенням середнього розміру гранул α-Fe, що зменшує ефективність спін-залежного розсіювання електронів. У плівках на основі Au і Co магнітні гранули Co мають дещо менші розміри, про що свідчать,

наприклад, дані роботи[16], згідно з якими розміри гранул ГЩП-Co у сплаві, отриманому методом одночасної конденсації компонент, змінюються в межах 2,5-10 нм у залежності від температури термообробки. Таким чином, у плівкових системах з обмеженою розчинністю компонент типу (Me_1+Me_2/П), як правило, стабілізуються лише обмежені тверді розчини із або тверді розчини без елементів гранульованого стану.

3. Магнітоопір і гігантський магнітоопір у високоентропійних плівкових сплавах

В останнє десятиліття проводяться інтенсивні дослідження кристалічної структури і механічних властивостей нового класу матеріалів – високоентропійних сплавів (ВЕС), на покращені властивості яких вперше звернули увагу автори[17]. Оскільки ці сплави формуються на основі 5–13 елементів (в основному це ГЦК і тугоплавкі ОЦК або ГЩК метали), то вони мають високу ентропію змішування (ΔS_{mix}), у ВЕС виявляються більш стійкіми фази у вигляді ОЦК чи ГЦК т.р. у порівнянні з інтерметалідними сполуками та іншими складними структурами. Залежно від концентрації окремих компонент (наприклад атомів Ni) може одночасно стабілізуватися ГЦК і ОЦК тверді розчини, де ОЦК може бути т.р. α-Fe(Cr) або інтерметалід AlNi [18]. Аналіз дозволяє зробити висновок, що стабілізація ГЦК або ОЦК повністю визначається середньою концентрацією валентних електронів на атом, розміщених у валентній зоні сплаву: при концентрації меншій 7,2 ел/ат утворюється ОЦК фаза, при 7,2 – 8,2 ел/ат – стабілізується двофазовий склад ГЦК+ОЦК, і при концентраціях, більших 8,2 ел/ат – ГЦК, – фаза т.р. ВЕС. У нітридній фазі ВЕС на основі Al, Cr, Nb, Ti та напівпровідника Si також стабілізується ГЦК фаза. Формування однофазного твердого розчину заміщення, замість

[16] Vrenken H., Kooi B.J., de Hosson T.M. Microstructure and properties of giant magnetoresistance granular Au80Co20 alloys. J. Appl. Phys. 2001. V. 89, № 6. P. 3381–3388. DOI 10.1063/1.1325381.

[17] Yeh J. W., Chen S. K., Lin S. J., Gan J. Y., Chin T. S., Shun T. T., Tsau C. H., Chang S. Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. Adv. End. Mater. 2004. V.6. P. 299–303. DOI 10.1002/adem.200300567.

[18] Карпець М.В., Макаренко О.С., Мисливченко О.М., Горбань В.Ф. Вплив Ni на фазовий склад, мікроструктуру та механічні властивості системи високоентропійних сплавів AlCrCoCuFeNix (x = 0; 0,5; 1; 2; 3). *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2014. Т.2. № 46. С. 46–52.

формування багатофазного з'єднання, суперечить правилу фаз Гіббса, яке визначає кількість фаз залежно від кількості елементів (зокрема, в шести- або семиелементних системах повинно формуватися, мінімум, сім або вісім рівноважних фаз відповідно). Однак вищевказане правило не діє у випадку ВЕС, тому що в їхньому випадку формування фазово-структурного складу регулюється ентропією змішування.

У випадку відхилення середнього атомного радіуса $\bar{r} = \sum_{i=1}^{n} c_i r_i$. викривлення кристалічних граток впливають на напружено-деформований стан матеріалу, що позначається на властивостях одержуваних матеріалів. Зміною концентрації лише одного складового елементу з, наприклад, п'яти можна добитися зміни структури від аморфної до кристалічної, а за властивостями – збільшення питомого електричного опору внаслідок зміни щільності точкових дефектів. Той факт, що кожен атом складового елемента ВЕС може з однаковою ймовірністю зайняти той або інший вузол у кристалічній гратці, впливає на кінетику дифузії. Різнорідність атомів приводить до зміни потенціальної енергії між вузлами кристалічних граток. Таким чином, у ВЕС спостерігається мінімальний коефіцієнт дифузії. Це впливає на безліч факторів, наприклад, ріст зерен відбувається повільніше, збільшується міцність під час термічної обробки, більшою є ймовірність формування наноструктур і нанорозмірних формувань. Остання особливість ВЕС – це наявність так званого ефекту перемішування. У деяких випадках у ВЕС формуються, окрім основної фази, інші – як упорядковані, так і неупорядковані – фази.

Нами використовувались два варіанти формування плівкових ВЕС: одночасна та пошарова конденсація. Перший варіант реалізується шляхом одночасної подачі напруги (до 20 В) на всі випарники. Плівкові ВЕС (загальна товщина зразка до 100 нм) на основі Fe, Ni, Co, Cu, Al і Cr формувались з використанням вакуумної установки типу ВУП-5М (тиск p ~ 10^{-3}-10^{-4} Па). Використовуються методи пошарової або одночасної конденсації 5-6-ти металів на підкладки із ситалу або SiO_2/Si. Під час пошарової конденсації товщина окремих шарів варіювалась від 10 до 30 нм. Товщини плівок контролюються in situ методом за допомогою кварцового резонатора типу РГ-08 з частотою 10 МГц (точність 10%). Час відпалювання експериментальних зразків при максимальній температурі складає 15 хвилин, а швидкість охолодження – 3 К/хв.

Після гомогенізації шляхом термічного відпалювання зразків формується ГЦК-фаза твердого розчину ВЕС із параметром a = 0,360 – 0,365 нм (у сплавах на основі Cu, Cr, Fe, Ni та Co) або a = 0,402 – 0,405 нм (у сплавах на основі Al, Cr, Fe, Ni та Co), тобто плівки стають однофазними. Вимірювання магнітоопору (МО) здійснювалося у трьох геометріях: поздовжній (вектор струму й індукції магнітного поля паралельні та лежать у площині плівки ($\vec{J} \parallel \vec{B}$)), поперечній ($\vec{J} + \vec{B}$) та перпендикулярній ($\vec{J} \perp \vec{B}$). Загальна товщина багатошарових плівок – 60-80 нм, робочий струм під час вимірювання опору – 10 мА. Енерго-дисперсійні спектри від зразків доводять високу чистоту отриманих плівок. Загальна характеристика плівкових ВЕС і результати вимірювання МО наведені в табл. 1.

Електронно-мікроскопічні дослідження вказують, що у вихідному стані (після конденсації) кристалічна структура виключно дисперсна (середні розміри кристалітів $L \leq 10$ нм), хоча у випадку відпалювання зразків до 850 К поряд із цією високодисперсною фракцією формується структура з величиною L до 50 нм.

Характер електронограм вказує на те, що на стадії конденсації у плівкових ВЕС формується дві ГЦК і ОЦК фази (т. зв. фаза В2). Формування ГЦК1 і ГЦК2 фаз пов’язане з незакінченістю процесу формування т.р. ВЕС, хоча під час відпалювання зразків до 850 К відбувається гомогенізація сплаву і формування на основі ГЦК1 і ГЦК2 т.р. ВЕС із ГЦК решіткою.

Таблиця 1

Загальна характеристика зразків і результати вимірювання МО при Т = 300К

№	Елементний склад зразків після відпалювання (концентрація, ат.%)	$T_в$, К	R, Ом при B = 0 Тл	МО, %
1	$Cu_{15}Ni_{23}Fe_{22}Co_{22}Al_{18}$/П	750	134.0	0.30 (⊥)
2	$Cu_{15}Ni_{25}Fe_{20}Co_{25}Al_{15}$/П	800	152.0 152.2	0.08 (+) 0.05 (⊥)
3	$Co_{20}Ni_{14}Cu_{20}Fe_{28}Al_{18}$/П	800	33.0 25.0 25.0	0.15 (‖) 0.17 (+) 0.20 (⊥)
4	$Co_{20}Ni_{25}Cu_{20}Fe_{20}Al_{15}$/П	800	47.0 48.0 48.4	0.15 (‖) 0.17 (+) 0.30 (⊥)

Скоріше за все одна із ГЦК фаз із самого початку формувалася як т.р. ВЕС, а інша представляла собою метастабільну фазу на основі Al і Ni, яка під час відпалювання розпалася. Термообробка зразків сприяє заліковуванню дефектів і деякому впорядкуванню т.р. Рефлекси від оксидів Al_2O_3 та Cr_2O_3 мають точковий характер і малу інтенсивність, що пов'язано з малою ефективною товщиною шарів Cr і Al. Крім того, відмітимо, що від ОЦК фази (фаза B2) фіксуються дві дуже слабких лінії (200) і (220), і при цьому найбільш інтенсивна лінія (110) не фіксується. Середнє значення параметра ГЦК решітки т.р. дуже добре узгоджується з відповідним параметром для т.р. Cu(Ni) a = 0,352 – 0,366 нм [19].

Дослідження МО у плівках ВЕС були проведені в геометрії CIP (струм у площині плівки) при трьох взаємних орієнтаціях магнітного поля: повздовжній, поперечній та перпендикулярній. Оскільки ГЦК т.р. ВЕС –типовий феромагнетик без елементів гранульованого стану, то в ньому має місце анізотропний магнітоопір (АМО). Ефект відпалювання до 800 К призводить до деякого збільшення амплітуди МО. Отримані результати однозначно вказують на реалізацію АМО із відносно малою амплітудою до 0,13%, що пов'язано з малими товщинами плівок (до 40 нм). Велике значення B_c, яке має місце в цьому випадку, розкидом розмірів гранул [20], на яких, в силу різних причин, не реалізується СЗРЕ. На рис. 7 наведені типові залежності МО у трьох геометріях вимірювання на прикладі плівки $Co_{22}Ni_{15}Cu_{20}Fe_{30}Al_{13}$/П. Амплітуда МО складає 0,15-0,17% у трьох геометріях вимірювання, а його польова залежність вказує на реалізацію ефекту ГМО. Ми робимо висновок, що таке розсіювання відбувається на квазігранулах, оскільки жодного іншого механізму не можна запропонувати.

Дослідження структурного та фазового стану, магніторезистивних властивостей плівкових ВЕС дозволяють зробити такі висновки: при конденсації плівок товщиною до 30 нм із подальшим відпаленням до 800 К можна сформувати однорідні плівки ВЕС з ГЦК граткою і параметрами, близькими до параметрів надлишкової

---

[19] Калініченко С.М., Ткач О.П., Гричановська Т.М., Однодворець Л.В. Терморезистивні властивості плівкових твердих розчинів на основі Cu та Ni. *Ж. нано- та електронної фізики*. Т. 7, № 4. 2015. С. 04048-1–04053-5.

[20] Мазур Ю.П., Остапенко Р.В., Семенько М.П. Вплив різних типів деформацій на електроопір високоентропійного стопу CrMnFeCoNi. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2016. Т. 14. № 4. С. 539–551.

компоненти Cu або Al; залежність МО від індукції магнітного поля має всі ознаки ГМО, завдяки чому можна зробити висновок про реалізацію в плівкових ВЕС спін-залежного розсіювання електронів. Відносно мала амплітуда ГМО пов'язана, перш за все, високою температурою вимірювання (300 К) та малою товщиною зразків.

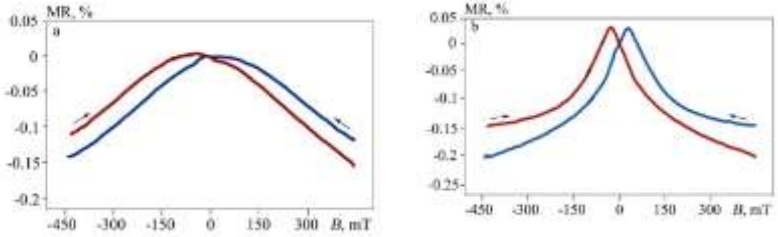


Рис. 7. Польові залежності МО для плівкового ВЕС, сформованого на основі системи Co(20)/Ni(14)/Cu(19)/ Fe(29)/Al(18)/П після відпалювання до 810 К поздовжньої (а) і перпендикулярної (б) геометрій вимірювання

ВИСНОВКИ

Нами проаналізовані літературні дані та результати власних досліджень магніторезистивних властивостей трьох типів плівкових матеріалів електроніки: багатошарових плівок, або мультишарів; гранульованих плівкових сплавів та багатокомпонентних (високоентропійних) твердих розчинів. За результатами досліджень можна зробити такі висновки.

1. У мультишарах, в яких чітко зберігається індивідуальність окремих немагнітних і магнітних шарів, у результаті СЗРЕ на інтерфейсах реалізується ефект ГМО, амплітуда якого збільшується під час зменшення температури вимірювання.

2. У мультишарах або багатошарових плівкових системах, в яких має місце необмежена або частково обмежена розчинність елементів, може реалізуватися як звичайний анізотропний магнітоопір за відсутності або суперпарамагнітного характеру гранул, так і ефект ГМО при однодоменному або багатодоменному характері нанагранул, на яких реалізується СЗРЕ; амплітуда ефекту також визначається температурою вимірювання і загальною товщиною зразка.

3. У гранульованих плівкових сплавах, сформованих під час одночасної або пошарової конденсації магнітних і немагнітних компонент зі значною взаємною розчинністю, утворюється система магнітних гранул, на яких реалізується СЗРЕ і, як наслідок цього, ефект ГМО.

4. У високоентропійних плівкових сплавах спостерігається як анізотропний, так і гігантський магнітоопір; їхня висока температурна стабільність дозволяє розглядати ВЕС як потенціальний магніторезистивний матеріал електроніки.

Робота виконана в рамках держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України № 0118U003580 (2018–2020 рр.).

АНОТАЦІЯ

У роботі проаналізовані літературні дані та результати власних досліджень магніторезистивних властивостей плівкових систем із різною архітектурою. Розглянуті три типи плівкових матеріалів, які знаходяться широке застосування в електроніці та сенсорній техніці. Мова йде про багатошарові системи, в т.ч. мультишари; гранульовані та багатокомпонентні (високоентропійні) плівкові сплави. Описана методика отримання цих трьох типів матеріалів, контролю їх фазового і елементного складу та вимірювання магнітоопору. Проаналізовані умови реалізації анізотропного та гігантського магнітоопору. Підкреслюється, що ці ефекти мають важливе значення з точки зору прикладного аспекту фізики і техніки плівкових матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Campbell I.A., Fert A. *Transport properties of ferromagnets. Ferromagnetic Materials*. Edited by E.P. Wohlfarth. 1982. V. 3. P. 747–800.

2. Grunberg P., Schreiber R., Pang Y.,. Brodsky M.B, Sowers H. Layered magnetic structures: evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr interlayers. *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 57, № 19. P. 2442–2445. DOI 10.1103/PhysRevLett.57.2442.

3. Ферт А. Происхождение, развитие и перспективы спинтроники. *Успехи физики металлов*. 2008. Т. 172, № 12. С. 1336–1348.

4. Berkowitz A. E., Mitchell J.R. , Carey M. J., Young A.P., Zhang S., Spada F.E., Parker F.T., Hutten A., Thomas G. Giant

magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys. *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 68, № 25. P. 3745–3748. DOI 10.1103/PhysRevLett.68.3745.

5. Грюнберг П.А. От спиновых волн к гигантскому магнитосопротивлению и далее. *Успехи физики металлов*. 2008. Т. 172, № 12. С. 1349–1358.

6. Tiwari A. Effect of addition of Ni on the structure and giant magnetoresistance in Fe–Cu films. *Physica B: Condens. Matter*. 2007. V. 387. P. 63–68. DOI 10.1016/j.physb.2006.03.029.

7. Hiep V.V. , Chau N. , Hong D.M. , Luong N. H. High coercivity and giant magnetoresistance of CoAg, CoCu granular films. *J. Magn. Magn. Mater*. 2007. V. 310. P. 2524–2526. DOI 10.1016/ j.jmmm.2006.11.136.

8. Yeh J. W., Chen Y. L., Lin S. J., Chen S. K. High-Entropy Alloys – A New Era of *Exploitation. Mater. Sci. Forum.* 2007. V. 560. P. 1–9. DOI 10.4028/ www.scientific.net/MSF.560.1.

9. Vorobiov S.I., Kondrakhova D.M., Nepijko S.A., Poduremne D.V., Shumakova N.I., Protsenko I.Yu. Crystalline structure, electrophysical and magnetoresistive properties of high entropy film alloys. *J. Nano- Electron. Phys*. 2016. V. 8, № 3. P. 03026-1–03026-5. DOI 10.21272/jnep.8(3).03026.

10. Bereznyak Yu.S., Opielak M., Odnodvorets L.V., Poduremne D.V., Protsenko I.Yu., Shabelnyk Yu.M. Crystalline structure and physical properties of high-entropy film alloys. *J. Nano- Electron. Phys*. 2019. V.11, №2. P. 02026-1–02026-6. DOI 10.21272/jnep.11(2).02026.

11. Yeh J.-W. Recent progress in high-entropy alloys. *Ann. Chim. Sci. des Matériaux.* 2006. V. 31. № 6. P. 633–648. DOI 10.3166/acsm.31.633-648.

12. Arana S., Castafto E., Gracia F.J. High temperature circular position sensor based on a giant magnetoresistance nanogranular Ag_xCo_{1-x} alloy *IEEE Sens. J. B*. 2004. V. 4. P. 221–225.

13. Baibich M.N., Broto J.M., Fert A., Vandau F.N., Petroff F., Eitenne P., Creuzet G. , Friederich A., Chazelas J. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices. *Phys. Rev. Lett*. 1988. V. 61. P. 2472–2475. DOI 10.1103/PhysRevLett.61.2472.

14. Кондрахова Д.М., Шабельник Ю.М., Синашенко О.В., Проценко І.Ю. Структурно-фазовий стан, електрофізичні та магнеторезистивні властивості твердих розчинів у плівкових системах на основі Co і Cu або Ag та Fe і Cr або Cu. *Успехи физики металлов*. 2012. Т. 13, № 3. С. 241–267.

15. Koltunowicz T.N., Bondariev V., Odnodvorets L.V., Protsenko S.I., Shumakova M.O., Tkach O.P. Electrophysical properties of granular film alloys. *Vacuum*. 2019. V. 164. P. 165–169. DOI 10.1016/j.vacuum.2019.04.015.

16. Vrenken H., Kooi B.J., de Hosson T.M. Microstructure and properties of giant magnetoresistance granular $Au_{80}Co_{20}$ alloys. *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89, № 6. P. 3381–3388. DOI 10.1063/1.1325381.

17. Yeh J. W., Chen S. K., Lin S. J., Gan J. Y., Chin T. S., Shun T. T., Tsau C. H., Chang S. Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Adv. End. Mater*. 2004. V. 6. P. 299– 303. DOI 10.1002/adem.200300567.

18. Карпець М.В., Макаренко О.С., Мисливченко О.М., Горбань В.Ф. Вплив Ni на фазовий склад, мікроструктуру та механічні властивості системи високоентропійних сплавів $AlCrCoCuFeNi_x$ (x = 0; 0,5; 1; 2; 3). *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2014. Т. 2. № 46. С. 46–52.

19. Калініченко С.М., Ткач О.П., Гричановська Т.М., Однодворець Л.В. Терморезистивні властивості плівкових твердих розчинів на основі Cu та Ni. *Ж. нано- та електронної фізики*. Т. 7, № 4. 2015. С. 04048-1–04053-5.

20. Мазур Ю.П., Остапенко Р.В., Семенько М.П. Вплив різних типів деформацій на електроопір високоентропійного стопу CrMnFeCoNi. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2016. Т. 14. № 4. С. 539–551.

Information about authors:
Odnodvorets L. V.,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Professor of Electronics, General and Applied Physics Department
Sumy State University
2, Rymskyi-Korsakov Str., Sumy, 40007, Ukraine

Protsenko I. Yu.,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Chairman of Electronics, General and Applied Physics Department
Sumy State University
2, Rymskyi-Korsakov Str., Sumy, 40007, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.15

ПРОЕКТ АВТОМОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ ІЗ СИЛОВИМ ЗБУДЖЕННЯМ КОЛИВАНЬ У ТЕХНОЛОГІЧНІЙ ПЛАТФОРМІ

Петров Л. М., Осєнчінін М. Г.

ВСТУП

Характер поведінки конструкції автомобільних систем залежить від багатьох параметрів. Для спрощення моделі автомобільної системи провідні світові автомобільні виробники враховують тільки найбільш важливі особливості в конструкції щодо деформування несучих систем автомобілів. Наприклад, твердісні властивості визначаються деформаціями конструкції, що багато в чому залежать від його надійної експлуатації. Для одержання картини залежності переміщення й сили від часу можна використовувати моделі Максвелла й Кельвіна (рис. 1, 2), для більш удосконаленої експлуатації автомобільної системи може бути запропоновано модель згідно з рис. 3[1].

Коефіцієнт пружності в цих моделях залежать від характеристик матеріалів і геометричних параметрів проектованої автомобільної системи. Завдяки цим моделям можна запропонувати конструктивні елементи, які створюють уповільнення і силовий вплив, що діють на автомобільну систему під час його розгону та руху.

---

[1] Бернацкий В.В. Специализированный подвижной состав грузового автотранспорта: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» направления подготовки дипломированных специалистов «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы». Москва : МГТУ «МАМИ», 2005. 48 с., с. 22–26.

Санкин Ю.Н. Частотный метод оценки курсовой устойчивости автомобиля на основе его моделей в виде систем с многими степенями свободы и нелинейным взаимодействием шин с дорожным покрытием / Ю. Н. Санкин, М. В. Гурьянов; под общ. ред. Ю. Н. Санкина. Ульяновск : УлГТУ, 2011. 243 с. С. 29–30.

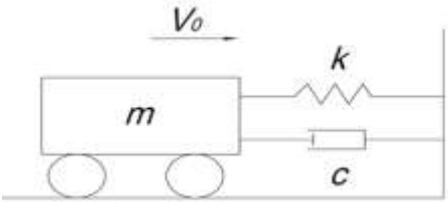


Рисунок 1. Модель Кельвіна*

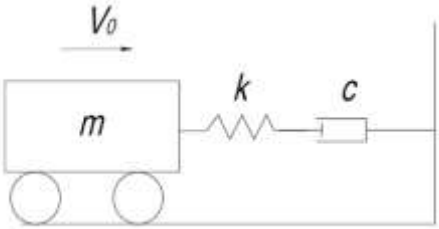


Рисунок 2. Модель Максвелла*

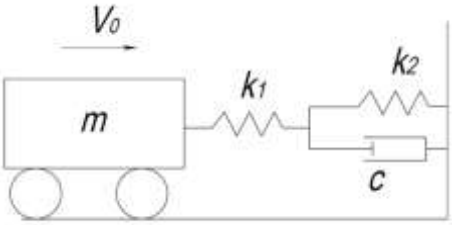


Рисунок 3. Змішана модель*

**де: V_0 – швидкість автомобіля; m – маса автомобіля; k_1, k_2 – коефіцієнти жорсткості; C – коефіцієнт в'язкості*

Такі схематичні моделі можуть бути застосовані для первісної оптимізації конструкції автомобільної системи й зменшення ресурсномістких розрахунків методом в середовищі Excel, MatLab. Іншим підходом до аналітичного моделювання руху автомобільної системи є енергетичний, що заснований на передачі енергії у коливальному русі пружної системи, яка перетворюється на кінетичну енергію автомобільної системи під час технологічного роз'єднання несучої системи. Для розв'язання такої складної

інженерної задачі можна використовувати комп'ютерні програми та спеціальні програми для розрахунків в середовищі Excel, при чому перевага віддавалася аналітичним методам розв'язання диференціальних рівнянь. Основні методи розрахунків складних процесів переміщення автомобільної системи подано в роботах Петрова Л. М.[2]

Застосовані розрахункові методи, які засновані на тому, що проводиться визначення картини деформації, потім отримані коефіцієнти використовують у розрахунках для подальшого проектування автомобільної системи.

Максимальна швидкість руху автомобільної системи становить близько 70 км/год, що зумовлено можливістю знехтувати процесом заносу за екстремальних умов її руху та зміщення рухомої платформи під час її пересування відносно несучої системи. Оскільки відсутнє дроселювання повітря у коливальній системі, а згідно з законом Джоуля-Томпсона навіть під час дроселювання повітря в пневморезонаторах температура не буде змінюватись. Отже, враховувати температурні режими, що виникають під час нагнітання повітря, недоцільно. При цьому отримана швидкість дасть змогу забезпечити максимальну акумуляцію рекуперованої енергії, що також зумовлене впровадженням управління пневмодинамічним поштовхом. Для регулювання початкового ступеня зарядки балонів-ресивера, який виконує функцію акумулятора, необхідно заряджати залежно від умов експлуатації. Враховуючи, що пневматична накопичувальна автомобільна система представляє собою не лише додатковий силовий рушій, а й також систему гальмування, клімат-контроль та систему охолодження в коливальній системі, то розрахунок раціональних параметрів коливальної системи та її маси необхідно проводити в комплексі, як єдине ціле. Отже, проведення аналізу динамічних навантажень ланок коливальної системи, системи в режимі переміщення автомобіля, складників резонаторного вузла, визначення закономірностей контактного тиску конструктивними параметрами елементів системи на технологічну платформу та удосконалення конструкції під'єднання технологічної платформи та несучої платформи з розгінним складником за допомогою

[2] Петров Л.М. Теорія оптимізації якісних показників колісного рушія. *Труды Одесского политехнического университета*, 2010. Вып. 1(33)–2(34), с. 65–69.

встановлення раціональних параметрів резонаторів рекуператорів несучої платформи, що дає можливість встановити тиск повітря, а тому й амплітуду резонаторів, під час їх роботи в режимі рекуперативного резонування за потрібною динамікою розгону автомобільної системи та визначення умов і способів підтримування динаміки руху автомобільної системи за відповідної динаміки зміни тиску в балоні-ресивері зі стисненим повітрям.

1. Об'єкт досліджень

Незалежно від конструкції підвіски технологічної платформи автомобільної системи будемо виходити з того, що кожна з пневморезонансних систем задана у вигляді певної функції[3]:

$$F_t = F_t\ (\mathrm{t}),$$

де t = 1,2,…, порядковий номер пневморезонатора.

Розглянемо простішу автомобільну систему, яка переміщується під дією примусової сили F(t). У любий момент часу на вантаж масою m, який знаходиться на технологічній платформі, діє дві сили: сила пружності гнучкого елемента, яка пропорційна зміщенню технологічної платформи X, та змушувальна сила F(t), яка змінюється у часі за законом, визначеним під'єднанням технологічної платформи до рами автомобільної системи (рис. 4, 5).

Для створеної автомобільної системи рівняння руху технологічної платформи з вантажем вагою m диференційне рівняння буде мати вигляд:

$$\mathrm{m}\frac{d^2x}{dt^2} + \mathrm{cx} = F_t\ , \qquad (1)$$

де C = Н/м – жорсткість пружного елемента; F_t – збуджуюча сила.

Поділивши обидві частини рівняння (1) на масу m, отримуємо рівняння руху автомобільної системи, яка запропонована згідно з рис. 4.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2\mathrm{x} = \frac{F(t)}{m}\ , \qquad (2)$$

[3] Шмидт Г. Параметрические колебания: Пер. с нем. Москва : Мир, 1978. 336 с. с 13–14

де $\omega^2 = \frac{c}{m}$

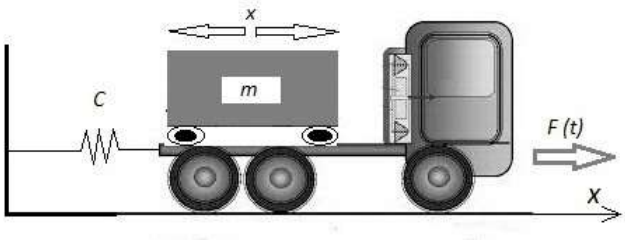


Рис. 4. Автомобільна система: С – жорсткість опорної поверхні; m – експлуатаційна маса; x – координата коливання

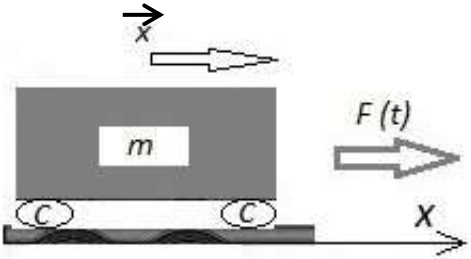


Рис. 5. Під'єднання технологічної платформи до автомобільної системи: F(t) – збуджуюча сила; С – жорсткість під'єднання технологічної платформи до рами автомобіля; m – маса технологічної платформи; $\vec{x}$ – напрямок руху технологічної платформи

Розглянемо рух автомобільної системи, коли вона відчуває поштовх, прикладений у момент часу t = τ, а дію постійно діючої сили F_t приведемо до одиниці (рис. 6).

В запропонованому випадку рух автомобільної системи буде виконуватись згідно з рівнянням:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 \mathrm{x} = \frac{1}{m}$$

Рішення такого рівняння повинне задовольняти початковим умовам: X = 0; $\frac{dx}{dt}$ = 0, при t = τ, та повинно уявляти суму[4] загального рішення відповідного однорідного рівняння:

$$x_1 = C_1 \sin\omega t + C_2 \cos\omega t$$

Та приватного (окремого) рішення заданого рівняння

$$x_2 = \frac{1}{m\omega^2} = \frac{1}{C}$$

Загальний вигляд

$$x = x_1 + x_2 = C_1 \sin\omega t + C_2 \cos\omega t + \frac{1}{C}$$

Використавши початкові умови, знаходимо постійні інтегрування C1 та C2

$$C_1 = -\frac{\sin\omega t}{c};$$
$$C_2 = -\frac{\cos\omega t}{c}$$

Та тоді

$$x = \frac{1 - cos\omega(t - \tau)}{C}$$

Остання формула буде визначати закон руху гнучкого елемента, який знаходиться під технологічною платформою (рис. 7). Максимальне значення зміщення x складає:

$$x_{max} = \frac{2}{c}$$

Тобто вдвічі перевищує переміщення, яке викликане статичною дією змушувальної сили F = 1.

[4] Л.Э. Эльсгольц Дифференциальные уравнения и вариационное исчисления. Москва : Книга по Требованию, 2012. 424 с. с 115–119.

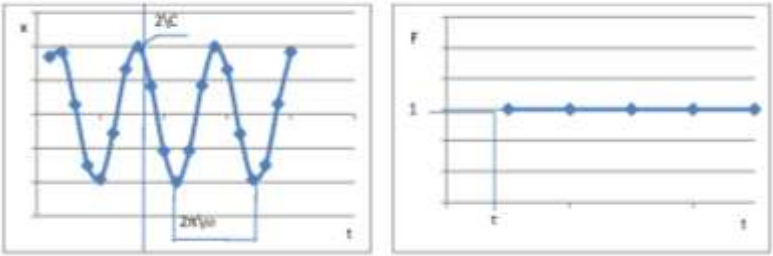


Рисунок 6. Залежність збуджуючої сили F та шляху від часу дії

Множення *Cf(t)* будемо сприймати як дію приведеної збуджуючої сили F(t), яка забезпечує рух автомобіля.

2. Методи і алгоритми

Розглянемо рух автомобільної системи, заподіяний пневмо-резонаторними пристроями. З цією метою в автомобільну систему резонаторні пристрої (пневморезонатори) (рис. 8) приймемо, що закон руху автомобільної системи підкоряється зміні деформації зчеплення енергетичного модуля з технологічним модулем у вигляді $f = f(t)$. Подовження гнучкого елемента у певний момент часу дорівнює $x - f$. При цьому сила пружності пружного елемента буде дорівнювати: $C(x - f)$

Тоді диференційне рівняння руху автомобільної системи буде мати вигляд:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = C(x - f) = 0$$

Розділимо обидві частини рівняння на вагу технологічної платформи та отримуємо рівняння:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = \frac{Cf(t)}{m},$$

Рівнянню (4) відповідає схема руху автомобіля з рухомою технологічною платформою (рис. 7).

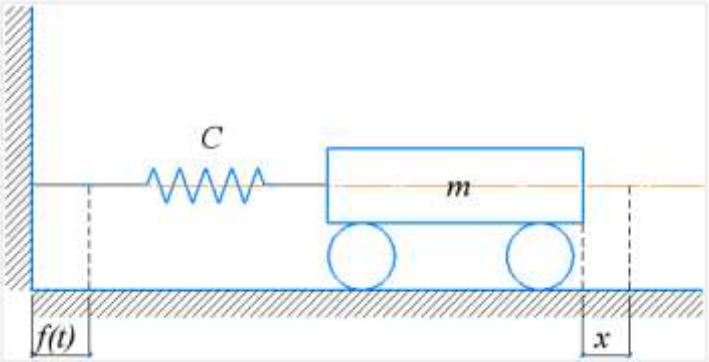


Рисунок 7. Схема автомобіля з рухомою технологічною платформою

Множення *Cf(t)* відносимо до дії приведеної вимушеної сили F(t), яка сприяє руху автомобільної системи.

3. Рівняння руху автомобільної системи під дією збуджуючої сили

Схема загального вигляду автомобільної системи з рухливою технологічною платформою показана на рис. 8.

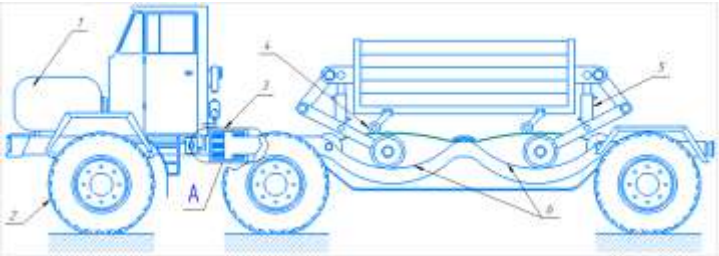


Рисунок 8. Схема загального вигляду автомобільної системи з рухливою технологічною платформою: 1 – балон-ресивер; 2 – опорні колеса; 3 – демпфер; 4 – важелі руху; 5 – пневморезонатори; 6 – несуча система

Метод варіації вільних постійних для визначення зміни збуджуючої сили.

Часне рішення рівняння (2):

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = \frac{F(t)}{m} \quad (3)$$

має вигляд:

$$x = C_1 \sin\omega t + C_2 \cos\omega t \quad (4)$$

Приймемо, що величини С1 та С2 будуть не постійними, а змінними. В результаті визначення шляху переміщення автомобільної системи x(t) буде спрямовано на визначення двох функцій-постійних, які змінюються з часом: $C_1(t)$ та $C_2(t)$[5].

Продиференціюємо рівняння (4), в якому постійні С1 та С2 будуть змінними:

$$\frac{dx}{dt} = C_1 \omega\cos\omega t - C_2 \omega\sin\omega t + \frac{dC_1}{dt}\sin\omega t + \frac{dC_2}{dt}\cos\omega t$$

Приймемо, що складники $C_1 \sin\omega t + C_2 \cos\omega t$ не впливають на інтенсивність руху автомобільної системи, а тому

$$\frac{dC_1}{dt}\sin\omega t + \frac{dC_2}{dt}\cos\omega t = 0 \quad (5)$$

Рівняння для визначення швидкості руху автомобільної системи прийме вигляд:

$$\frac{dx}{dt} = C_1 \omega\cos\omega t - C_2 \omega\sin\omega t \quad (6)$$

Продиференціювавши рівняння (6), отримуємо рівняння щодо прискорення, з яким рухається автомобільна система:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = - C_1 \omega^2 \sin\omega t - C_2 \omega^2 \cos\omega t + \frac{dC_1}{dt}\omega\cos\omega t - \frac{dC_2}{dt}\omega\sin\omega t \quad (7)$$

Підставимо у рівняння (3) рівняння (4) та (7) отримуємо рівняння зв’язку змінних постійних та збуджуючої сили, яка забезпечує переміщення автомобільної системи:

[5] Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. Москва, 1965 г., 780 стр. с илл. С. 315–316

$$\frac{dC_1}{dt}\cos\omega t - \frac{dC_2}{dt}\sin\omega t = \frac{F(t)}{m\omega} \quad (8)$$

Підставивши (5) та (8), заходимо похідні $\frac{dC_1}{dt}$ і $\frac{dC_2}{dt}$

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{F(t)}{m\omega}\cos\omega t;$$
$$\frac{dC_2}{dt} = -\frac{F(t)}{m\omega}\sin\omega t$$

Після інтегрування отримуємо систему коефіцієнтів С1 та С2

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{m\omega}\int_0^t F(\tau)cos\omega\tau d\tau + B_1; \\ C_2 = -\frac{1}{m\omega}\int_0^t F(\tau)cos\omega\tau d\tau + B_2; \end{cases}, \quad (9)$$

де B_1 та B_2 – коефіцієнти, які визначають координати зміщення технологічної платформи.

Після підстановки рівняння (9) у рівняння (4) отримуємо рівняння переміщення технологічної платформи:

$$x = \frac{1}{m\omega}\left[sin\omega t\int_0^t F(\tau)cos\omega\tau d\tau - cos\omega t\int_0^t F(\tau)sin\omega\tau d\tau\right] + \\ + B_1\sin\omega t + B_2\cos\omega t \quad (10)$$

Поєднуючи інтеграли в рівнянні (10), отримуємо спрощене рівняння переміщення автомобільної системи

$$x = B_1\sin\omega t + B_2\cos\omega t + \frac{1}{m\omega}\int_0^t F(\tau)sin\omega(t-\tau)d\tau \quad (11)$$

З рівняння (7) після диференціювання отримуємо рівняння швидкості, з якою може рухатись автомобільна система:

$$\frac{dx}{dt} = B_1\omega\cos\omega t - B_2\omega\sin\omega t + \frac{1}{m}\int_0^t F(\tau)cos\omega(t-\tau)d\tau \quad (12)$$

Значення коефіцієнтів координат зміщення технологічної платформи знаходимо, коли призначимо графічні координати початку відліку руху автомобільної системи. Приймемо, що при t=0 переміщення почалось x = 0, x_0=V_0. Тоді, згідно з рівняннями (10) та (12) отримуємо

$$B_1 = \frac{V_0}{\omega};$$
$$B_2 = x_0$$

Зі значенням набутих коефіцієнтів координат зміщення технологічної платформи знаходимо рух автомобільної системи:

$$x = x_0 cos\omega t + \frac{V_0}{\omega}\sin\omega t + \frac{1}{m\omega}\int_0^t F(\tau) sin\omega(t-\tau)d\tau$$

У формулі складники, які не знаходяться під знаком інтеграла, визначають рух автомобільної системи на її початку. Складник зі знаком інтеграла визначатиме дію збуджуючої сили F(t).

4. Результати досліджень

Результати досліджень впливу на рух автомобільної системи вихідних параметрів (t – час, C – жорсткість пружного елемента, ω – колова частота, F – збуджуюча сила) представлені на графіках (рис. 9–14).

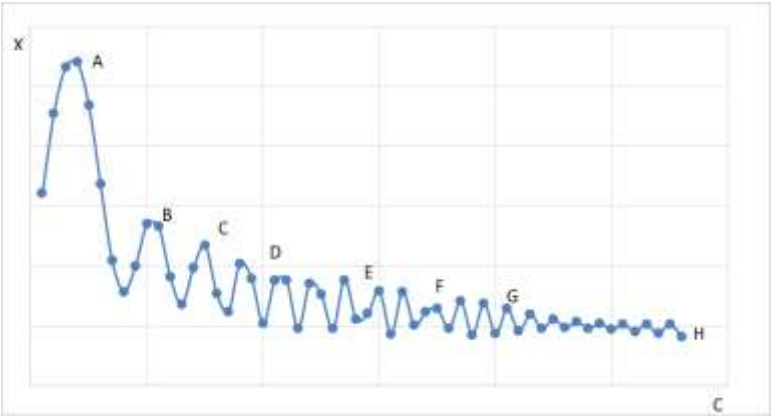


Рис. 9. Залежність переміщення автомобільної системи від жорсткості пружних елементів

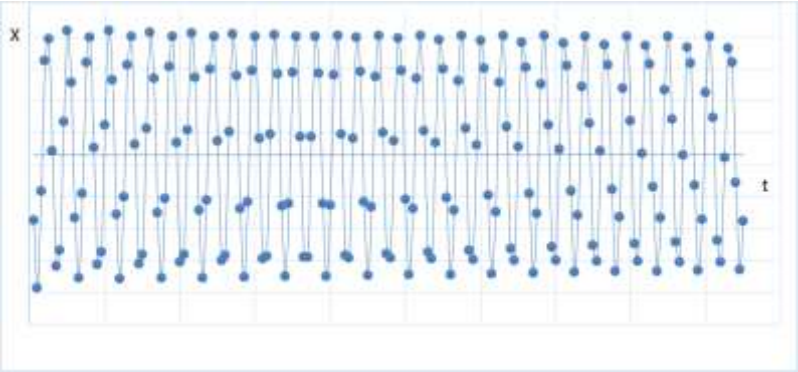


Рис. 10. Залежність переміщення автомобільної системи від часу

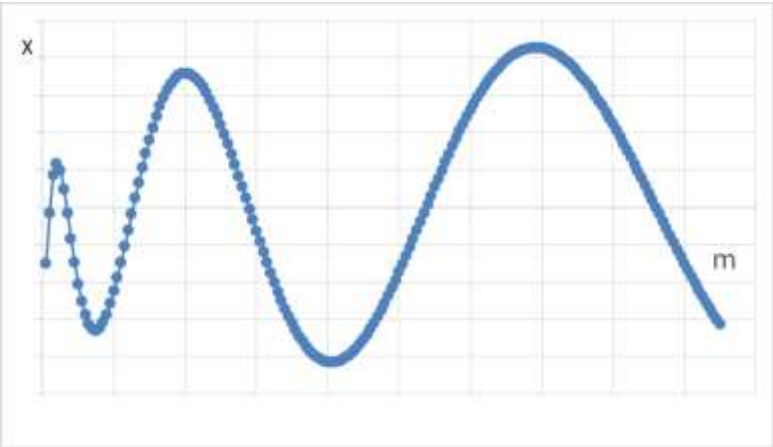


Рис. 11. Вплив експлуатаційної маси на коливання технологічної платформи з одночасним переміщенням автомобільної системи

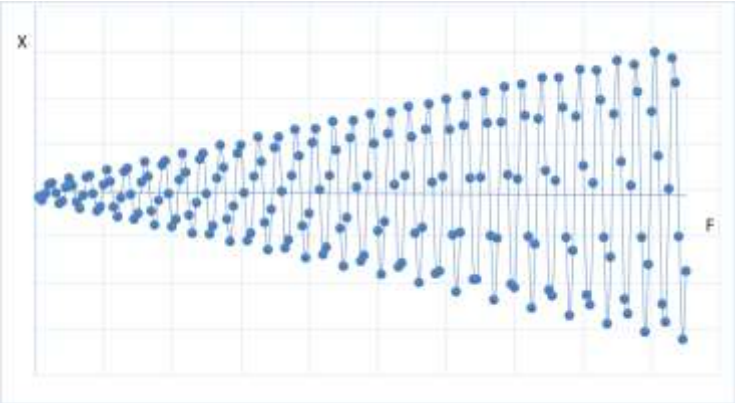


Рис. 12. Вплив збуджуючої сили на переміщення автомобільної системи

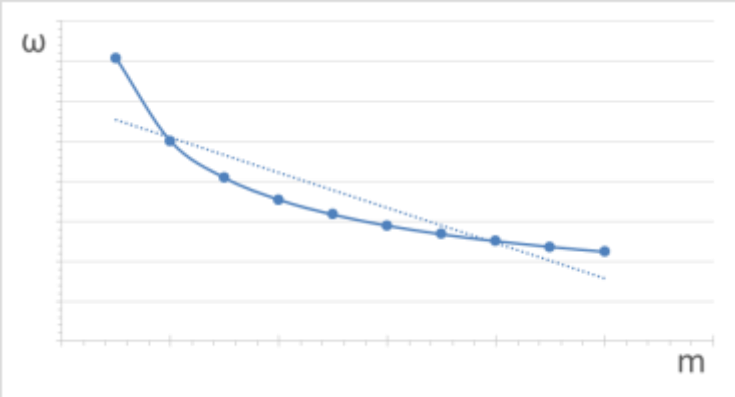


Рис. 13. Визначення оптимальної зони колової частоти від впливу на неї маси

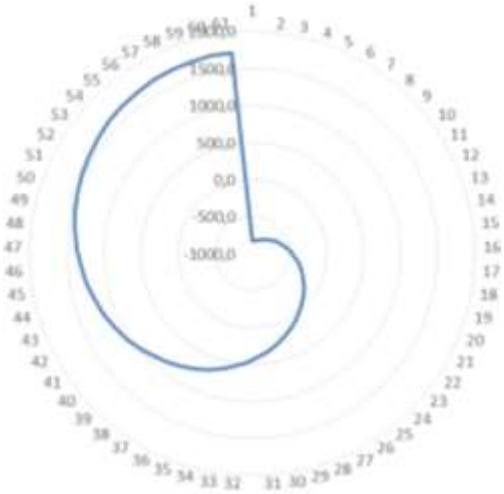


Рис. 14. Діаграма зони роботи пневморезонаторів

ВИСНОВКИ

1. Створено автотранспортну систему з динамічно-роз'єднаними експлуатаційними вагами.
2. Запропоновано теоретичну технологію «витягування» однієї ваги автотранспортної системи відносно другої та навпаки.
3. Розроблено математичну модель автотранспортної системи з взаємовитягуванням рухомих ваг одна відносно другої для відпрацювання руху цієї системи під дією пневморезонаторів з мінімальними витратами енергії.

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто можливість створення автотранспортної системи з динамічно роз'єднаними експлуатаційними вагами, які у процесі взаємного зміщення відпрацьовують силу збудження у напрямку руху, що дозволяє процес переміщення автотранспортного засобу перетворити на процес «витягування» однієї ваги відносно другої та навпаки. З цією метою технологічна платформа була рухомо під'єднана до загальної платформи за допомогою пневморезонаторів.

Розроблено математичну модель автотранспортної системи з взаємовитягуванням рухомих ваг одна відносно другої для відпрацювання руху цієї системи під дією пневморезонаторів з мінімальними витратами енергії. Результати розрахунків по

отриманому диференційному рівнянню показали зону найбільш ефективної роботи пневморезонаторів.

Розглянуто можливість створення теоретичного макету автотранспортної системи з пневматичними резонаторами, рух якої забезпечує збуджуюча сила. Альтернативним джерелом енергії для силових установок автомобільних систем може бути використано стиснуте повітря, яке накопичене у пневморисевері, яка потім з пневморесивера використовується у пневморезонаторах як механічна енергія у перетворенні потенціальної енергії на кінетичну енергію руху технологічної платформи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бернацкий В. В. Специализированный подвижной состав грузового автотранспорта: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» направления подготовки дипломированных специалистов «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы». Москва : МГТУ «МАМИ», 2005. 48 с.
2. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. Москва, 1965 г., 780 стр. с илл.
3. Петров Л.М., Теорія оптимізації якісних показників колісного рушія. *Труды Одесского политехнического университета*. 2010. Вып. 1(33)–2(34), с. 65–69.
4. Шмидт Г. Параметрические колебания: Пер. с нем. Москва : Мир, 1978. 336 с.
5. Санкин Ю.Н. Частотный метод оценки курсовой устойчивости автомобиля на основе его моделей в виде систем с многими степенями свободы и нелинейным взаимодействием шин с дорожным покрытием ; под общ. ред. Ю. Н. Санкина. Ульяновск : УлГТУ, 2011. 243 с.
6. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисления. Москва : Книга по Требованию, 2012. 424 с.

Information about authors:

Petrov L. M.,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Military Academy Odessa city
21, First Station Str., Odessa, 65000, Ukraine

Osienchinin M. H.,
Bachelor, Commander of a Training Group
Military Academy Odessa city
10, Fountain road, Odessa, 65000, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.16

ВПЛИВ РІЗНИХ МЕТОДІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ТЕХНОЛОГІЮ М'ЯСНИХ ДЕЛІКАТЕСІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Пешук Л. В., Сімонова І. І.

ВСТУП

Харчування є одним із найважливіших чинників, що визначають стан здоров'я населення. Раціональне харчування необхідне для підтримання нормального функціонування здорового організму. М'ясо і продукти з нього є одними з найцінніших в харчуванні людини. Тому вдосконалення асортименту м'ясних продуктів повинні ґрунтуватися на концепції збалансованого харчування і враховувати енергетичну, біологічну та харчову цінність кожного продукту[1,2,3]. Особливе місце займають продукти спеціального призначення з підвищеною біологічною цінністю[4]. Значним попитом користуються в Україні м'ясо птиці та кроля. Ураховуючи високу біологічну цінність, м'ясо індиків та кролів рекомендують включати в меню людям усіх вікових груп, а також широко використовувати в лікувальному харчуванні[5,6].

---

[1] Peshuk L.V., Galenko O.O., Budnik N.V. Use of collagenase in technology gerodietetic products. *Journal of food and packing science, technique and technologies*. 2014. 2(3). P. 8–11.

[2] Пешук Л.В., Гащук О.І, Москалюк О.Є. Інноваційні м'ясні продукти. *Харчова промисловість*. 2015. 17. С. 64–67.

[3] Simonova I., Peshuk L. Galenko J. Microscopic examinayion of chops with content of lentil flour. Ukranian Journal of Food Science. 2019. Volume 7. Issue 1. P.16–26. DOI: 10.24263/2310-1008-2019-7-1-4.

[4] Brenes A., Viveros A., Chamorro S., Arija I. Use of polyphenol-rich grape by-products in monogastric nutrition. A review. *Animal Feed Science and Technology.* 2016. Volume 211. P. 1–17. DOI.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.016.

[5] Dal A., Simona B., Marco C. M., Szendrő Z., Gerencsér Z., Matics Z., Castellini C., Szin M., Zotte A. Effect of diet and packaging system on the oxidative status and polyunsaturated fatty acid content of rabbit meat during retail display. *Meat Science.* 2018. Volume 143. P. 46-51. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.004.

[6] Спосіб виробництва сиров'ялених продуктів із м'яса індиків і кролів «Торіно»: пат. на винахід 104679 Україна: МПК 51 А 23 С 11 /00 Пешук Л.В., Дидюк О.Ю., Дубяга О.М; власник НУХТ. № а201214239; заявл. 13.12.2012; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 10.

Особливо корисно м'ясо індиків та кролів для дітей, людей похилого віку й осіб[7], що страждають на зайву вагу, оскільки має невисоку калорійність (736,38 та 765,67 кДж). Науковці працюють над можливістю використання індиків та кролів у технологіях ковбас, копченостей, посічених напівфабрикатів, м'ясних консервах[8]. Вивчено хімічний склад фрикадельок, гамбургерів, сосисок, шинок та рулетів[9]. Готові вироби характеризуються збалансованим амінокислотним та жирно-кислотним складом, багаті на мінеральні речовини такі як кальцій, залізо, фосфор, магній, калій, натрій, цинк[10].

Із метою подовження терміну зберігання готових виробів в рецептуру вводять природні антиоксиданти[11]. Розмарин, шавлія, червоний та чорний перець, майоран, екстракт виноградних кісточок пригнічують окиснення ліпідів та подовжують терміни зберігання виробів[12]. В останні роки актуальним в технологіях м'ясних виробів є використання олеорезинів.

Вони є складною багатокомпонентною сумішшю натуральних органічних речовин, які в порівнянні із прянощами містять у 10 разів більше ефірних олій, окрім антиоксидантних властивостей, покращують органолептичні показники готових виробів. Оскільки

---

[7] José Manuel. Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Meat Science.* 2016. Volume 121. P. 175–181. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.018.

[8] Cullere M., Dalle A., Zotte, Tasoniero G., Giaccone V., Szendrő Z., Szín M., Odermatt M., Gerencsér Z., Dal Bosco A., Matics Z. Effect of diet and packaging system on the microbial status, pH, color and sensory traits of rabbit meat evaluated during chilled storage. *Meat Science.* 2018. Volume 141. P. 36–43. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2018.03.014.

[9]Mancini S., Nuvoloni R., Pedonese F., Paci G. Effects of garlic powder and salt additions in rabbit meat burgers: Preliminary evaluation. *Food processing and precervation*. 2019. Volume 133,3. P. 1–10. DOI.org/10.1111/jfpp.13894.

[10] Ding Y., Lin H.-W., Lin Y.i-L., Yang D.-J., Yu Y.-S., Chen Jr.-W., Wang S.-Y., Chen Y.-C. Nutritional composition in the chia seed and its processing properties on restructured ham-like products. *Journal of Food and Drug Analysis.* 2018. Volume 26(1). P. 124–134. DOI.org/10.1016/j.jfda.2016.12.012.

[11] Youling J. J., Xiong L. Natural antioxidants as food and feed additives to promote health benefits and quality of meat products: *A review. Meat Science.* 2016. Volume 120. P. 107-117. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.005.

[12] Mattioli S., Dal Bosco A., Szendrő Zs., Cullere M., Gerencsér Zs., Matics Zs., Castellini C., Dalle Zotte A. The effect of dietary Digestarom herbal supplementation on rabbit meat fatty acid profile, lipid oxidation and antioxidant content. *Meat Science.* 2016. Volume 121. P. 238-242. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.024.

частка м’ясних продуктів спеціального харчування із м’яса індиків і кролів на ринку України незначна, актуальним є вирішення завдань щодо розроблення технології м’ясних делікатесних шинок із даної сировини[13].

1. Технологічний процес виготовлення делікатесного продукту – шинок із м’яса індиків та кролів

Мета роботи – розроблення технології делікатесних продуктів із м’яса індиків та кролів, дослідження різного впливу термічної обробки (варіння, коптіння та запікання) на фізико-хімічні, функціонально-технологічні, мікробіологічні характеристики готового продукту під час зберігання. Об’єкт досліджень – технології шинок з м’яса індиків та кролів.

Для виробництва шинок методом математичного моделювання щодо оптимального вмісту білка в рецептурі готового продукту за незамінними амінокислотами встановлено співвідношеннях м’ясо індика і кроля 65 до 35 кг (таблиця 1). За контроль взято рулет «Курячий» ТУ У 15.1-30978685-006-2001.

Таблиця 1

Рецептура шинки вз м’яса індика і кроля

Основна сировина, кг	
Індика	65
Кроля	35
Прянощі та допоміжні матеріали, г на 100 кг несоленої сировини	
Сіль харчова	2200
Нітрит натрію	0,005
Олеорезин римського кмину	0,8
Олеорезин перцю білого	1
Вода	30 л

Технологічний процес виробництва шинки проводився відповідно до технологічної інструкції і складався з таких етапів:

– вхідне контролювання і приймання сировини та матеріалів;
– підготовка сировини та матеріалів;
– приготування фаршу;

[13] Dalle A., Zotte C., Celia Zs., Szendrő. Herbs and spices inclusion as feedstuff or additive in growing rabbit diets and as additive in rabbit meat: A review. *Livestock Science.* 2016. Volume 189. P. 82–90. DOI.org/10.1016/j.livsci.2016.04.024.

– визрівання фаршу;
– наповнення оболонок фаршем;
– термічна обробка;
– контролювання якості готової продукції;
– маркування, пакування, зберігання.

Термічну обробку дослідних зразків шинок проводили трьома способами: виготовлення шинки вареної проводили в термокамері «Novotherm» за такими етапами термообробки: підсушування за температури 45-50°С до появи рожевого кольору фаршу і підсихання поверхні оболонки, обжарювання димом за температури 85-90°С, варіння у штучних білкових оболонках «Білкозин» (температура 75±2°С (40-80 хвилин)); охолодження 2-3 години холодним повітрям до температури 8°С в товщі батону.

Термічну обробку шинки копчено-вареної проводили в термокамері «Autotherm» таким чином: підсушували і обжарювали батони 15-30 хв. за температури 60±5 °С, відносної вологості повітря 10-20% і швидкості руху повітря 2 м/с; коптіння проводили відразу після обжарювання від 10 до 25 хв. за температури 75±5°С до досягнення в центрі батону температури 71±1°С; варіння у штучних білкових оболонках проводили за температури 75±2°С. Тривалість варіння – 55-60 хв. на 1 кг маси продукту в залежності від діаметра батону 40-60 хв., охолодження проводили холодним повітрям до температури 8°С в товщі батону.

Виготовлення шинки запеченої проводили в жарочній шафі «Агро-терм»: підсушували за температури 55-65°С, відносної вологості 30% протягом 25-30 хв.; запікання проводили за різних температурних режимів до досягнення температури в центрі батону 72±1°С: на першій стадії термообробки запікали за температури 120°С до досягнення температури в товщі батону 28 °С; на другій стадії запікали за температури 130 °С до температури в товщі батону 35°С і на третій – запікали за температури 140°С до температури в батоні 72°С. Охолоджували холодним повітрям до температури 8°С.

Під час виконання досліджень використовували такі методи: фізико-хімічні (масова частка вологи, білка, жиру, золи, амінокислотний склад); функціонально-технологічні (волого-утримуюча, вологозв’язуюча, жироутримуюча здатності, пластичність); мікробіологічні (загальна кількість мезофільних аеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів, бактерій

групи кишкової палочки (коліформи), патогенних мікроорганізмів, в т. ч. сульфідредукувальних клостридій, бактерій роду *Proteus, Salmonella, Staphylococcus aureus, L. monocytogenes*)[14]. Відносну біологічну цінність продукту і безпечність визначено in vivo на тест-організмах *Tetrahymena pyriformis*[15]. Аналіз експериментальних даних проводили з використанням методів розрахунку статистичної достовірності результатів досліджень.

2. Результати досліджень делікатесного продукту – шинок із м'яса індиків та кролів

Використання в рецептурі м'яса індика і кроля призводить до покращення якісних показників готових виробів, зокрема біологічної цінності. За вмістом білка розроблені шинки переважають контроль на 41% (шинка варена), 42,1% (шинка копчено-варена), 43,5% (шинка запечена). За вмістом жиру – на 53,9% менше порівняно з контролем (табл. 2). Отже, розроблений продукт має дієтичні властивості.

Таблиця 2

Хімічний склад готових виробів

№ п/п	Найменування виробу	Вміст вологи, %	Білок, %	Жир, %	Зола, %	Калорійність кДж
1	Контроль	65,41±1,0	12,30±0,1	17,42±0,07	4,87±0,01	862,39
2	Шинка варена	67,28±1,1	20,91±0,1	9,30±0,04	2,61±0,01	717,19
3	Шинка копчено-варена	66,83±0,9	21,25±0,4	9,39±0,05	2,51±0,02	709,66
4	Шинка запечена	65,94±1,0	21,77±0,2	9,59±0,05	2,72±0,01	725,94

Оскільки фарш під час виготовлення шинок використовувався один, а термічна обробка – різна, нами проведено аналіз

[14] Маркович І.І. Зміни мікробіологічних показників напівкопчених ковбас у процесі зберігання. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2015. № 3. Режим доступу: URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2015_3_18.

[15] Drachuk U., Simonova I., Halukh B., Basarab I., Romashko I. The study of lentil flour as a raw material for production of semi-smoked sausages. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2018. № 6. 11 (96). P. 44-50. DOI:10.15587/1729-4061.2018.148319.

амінокислотного складу шинок відповідно до температурних режимів. У фарші вміст незамінних амінокислот становив 5,03 мг на 100 мг продукту, у вареній шинці – 4,64, у запеченій – 4,98, у копчено-вареній – 4,39. Для моніторингу впливу температурних режимів на якісний та кількісний склад білку проводили вивчення амінокислотного складу готових виробів (табл. 3).

Таблиця 3

Амінокислотний склад шинок

Амінокислота	**Кількість, мг амінокислоти/100 мг продукту**			
	Фарш	**Варена шинка**	**Запечена шинка**	**Копчено-варена шинка**
Незамінні амінокислоти				
Валін	0,617	0,445	0,612	0,537
Лейцин	1,061	1,063	1,092	0,940
Ізолейцин	0,562	0,415	0,546	0,477
Лізин	1,192	1,156	1,224	1,062
Метіонін	0,291	0,378	0,221	0,207
Фенілаланін	0,572	0,532	0,574	0,507
Треонін	0,734	0,650	0,715	0,658
Триптофан	Не досліджували			
Всього незамінних амінокислот	5,029	4,639	4,984	4,388
Замінні амінокислоти				
Гістидин	0,430	0,487	0,451	0,397
Аргінін	0,851	0,857	0,871	0,778
Аспараг. к-та	1,343	1,315	1,255	1,133
Серин	0,638	0,629	0,637	0,561
Глутамін. к-та	2,772	2,670	2,761	2,458
Пролін	0,613	0,546	0,550	0,541
Гліцин	0,636	0,647	0,639	0,579
Аланін	0,832	0,846	0,854	0,741
Цистин	0,130	0,119	0,148	0,118
Тирозин	0,506	0,416	0,492	0,425
Всього замінних амінокислот	8,751	8,532	8,657	7,732
Сума:	13,780	13,171	13,641	12,120

У 100 мг продукту міститься певна кількість білка, а відповідно, й амінокислот. Але в процесі термічної обробки в різних продуктах по-різному виділилася волога. Наприклад, у запеченій шинці лише

65,94% вологи, в той час як у вареній її – 67,25%. Тому має місце аналіз як вмісту амінокислот в готових продуктах та фарші, так і вмісту амінокислот безпосередньо в білку з урахуванням різної кількості вологи в готових продуктах. Із таблиці 3 видно, що загальна сума амінокислот запеченої шинки становить 13,64 мг, що на 13,08 мг більше ніж, у копчено-вареній, на 11,56 мг – ніж у запеченій, на 0,47 мг – ніж у вареній.

Залежність між біологічною цінністю білків і їхнім амінокислотним складом може бути лише за умови достатньо високих швидкостей перетравлювання білків ферментами травного тракту. За амінокислотним складом і аналітичним розрахунком показників біологічної цінності можна отримати уявлення лише про потенційну цінність білкового компоненту продукту. Оскільки організм людини використовує не все, що надходить з їжею, а тільки те, що після перетравлювання у травному тракті всмоктується стінками кишечника у кров. Одним із основних показників, що визначає біологічну цінність харчових продуктів, є ступінь перетравлення білків протеолітичними ферментами шлунково-кишкового тракту. Для дослідження цього нами проведено експеримент на культурах клітин інфузорії *Tetrahymena pyriformis.* Вони в морфологічному аспекті є клітинами, а в фізіологічному – цілісним організмом. Тому перетравлення білків травними ферментами в умовах in vivo можна використовувати для прогнозування ступеня їх утилізації організмом. Із метою визначення засвоюваності розроблених шинок в умовах і in vivo в порівнянні з контрольним зразком визначено відносну біологічну цінність.

Відносна біологічна цінність дослідних зразків із використанням даної сировини перевищує контроль у середньому на 28%. Зокрема, в шинці вареній, копчено-вареній, запеченій цей показник становить, %: 88,94; 89,34 та 96,68. Це пояснюється швидкістю розвитку клітин війчастих інфузорій *Tetrahymena pyriformis* – кількість клітин, які виросли на поживному середовищі з використанням контрольного зразка, становить 288,34, а дослідних, кл/мм^3 – 421,18; 423,70 та 456,51 відповідно (табл. 4).

Як видно з даних табл. 6, у зразку шинки запеченої відносна біологічна цінність має тенденцію до зростання і становить 96,68 %. Такий результат пояснюється рецептурним складом. Коефіцієнт ефективності використання білка (КЕВБ) організмом у дослідних

зразках шинок складає 0,19 – 0,22% що на 35% більше порівняно з контролем. Ефективність біологічної дії під час засвоювання білка (ЕБД) щодо контрольного зразка значно вища у шинці запеченій (93,34 %) та копчено-вареній (84,5). Стандартизована відносна білкова ефективність фаршів (СВБЕ) повніша порівняно з контролем у запеченій та копчено-вареній шинці. Цей показник становить 462,37% та 418,5%. Гіршим показником у порівнянні з контролем характеризуються шинка варена.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика відносної біологічної цінності і відносної ефективності використання білка дослідних зразків

зразок	**вміст білка,%**	**Кількість клітин, кл/мм^3**	**Відносна біологічна цінність (ВБЦ), % до еталону*)**	**Коефіцієнт ефективності використання білка (КЕВБ), %**	**Ефективність біологічної дії при засвоювання білка (ЕБД), %**	**Стандартизована відносна білкова ефективність фаршів (СВБЕ), %**
Казеїн молока	100	473,25	100	0,04	–	–
Контроль рулет «курячий»	12,3	288,34	60,92	0,14	–	298,66
Шинка варена	20,91	421,18	88,94	0,19	82,85	410,41
Шинка копчено-варена	21,25	423,70	89,34	0,19	84,5	418,50
Шинка запечена	21,77	456,51	96,68	0,22	93,34	462,37

Примітка: за еталон використовували поживне середовище з казеїном молока

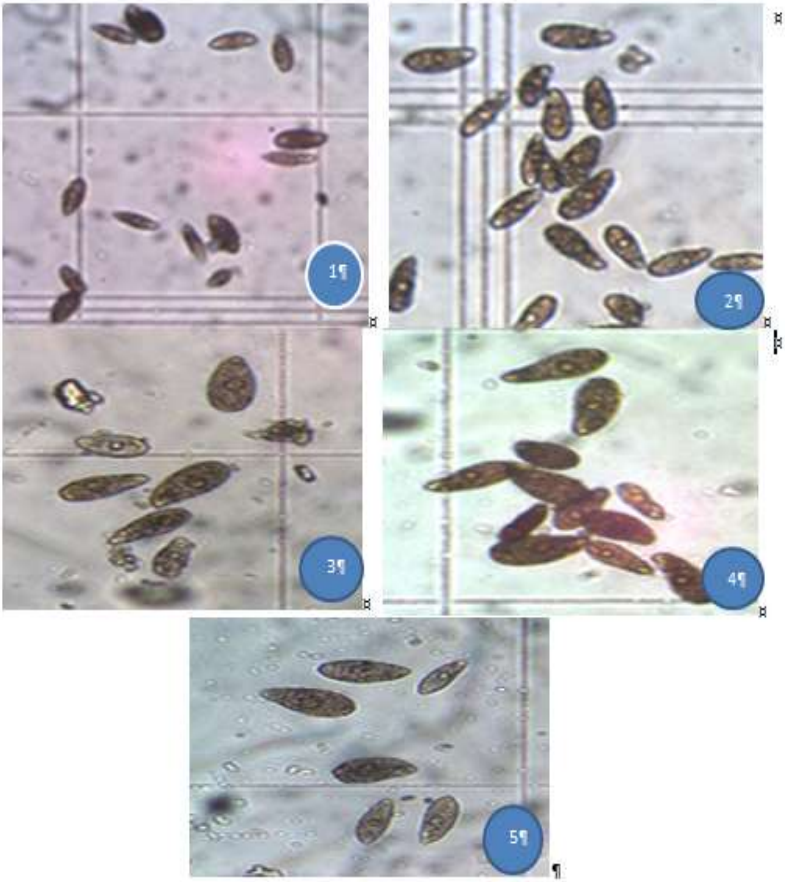


Рисунок 1. Морфологія клітин інфузорій *Tetrahymena pyriformis* за культивування в середовищах: 1 − казеїном молока; 2 – контролем; 3 − із шинкою вареною; 4 − із шинкою копчено-вареною; 5 – із шинкою запеченою

Слід зауважити, що під час проведення дослідження впливу допоміжної сировини на життєдіяльність найпростіших організмів морфологічних змін клітин війчастих інфузорій *Tetrahymena pyriformis* не виявлено. Інфузорії, вирощені на середовищах із дослідними зразками, більш округлі, краще проглядаються,

кількість клітин зростає порівняно з контролем. Отже, використана сировина не містить шкідливих та небезпечних сполук.

Визначення функціонально-технологічних властивостей (ФТВ) дає повну уяву про м'ясну систему, її структуру, здатність поглинати та утримувати вологу під час теплової обробки. Урахування функціонально-технологічних властивостей м'ясної сировини дозволяє раціонально використовувати її, прогнозувати та направлено регулювати якісні характеристики готових виробів. Результати досліджень функціонально-технологічних властивостей м'ясних фаршів наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Функціонально-технологічні властивості м'ясних фаршів

Зразок	**ВЗЗ фаршу, % до загальної вологи**	**СФЕ, %**	**Жироутримуюча здатність, %**	**Вологопоглинаюча здатність,%**	**Пластичність, $см^2/г$**
Контроль	87,1±1,1	90,5±0,7	71,4±1,1	83,3±1,1	7,76±0,1
Фарш шинки вареної, копчено-вареної, запеченої	89,3±0,9	72,6±0,9	73,8±1,0	84,8±1,2	8,53±0,1

Шинки варена, копчено-варена та запечена виготовлені з одного фаршу, тому для визначення стабільності фаршевої емульсії, волозв'язуючої (ВЗЗ), жиро- (ЖУЗ) та вологопоглинаючої (ВУЗ) здатностей відбирали лише один зразок. Дослідні зразки шинок переважали контроль за ВВЗ фаршу до загальної вологи на 2,2%, ЖУЗ – на 2,4% та ВУЗ – що на 1,5% краще, ніж у контрольному зразку відповідно. Пластичність шинок вареної, копчено-вареної, запеченої вища на 0,77% за контроль і становить 8,53%.

Одним із важливих факторів, який необхідно враховувати під час виробництва шинкових виробів, є їхня здатність зберігати якісні характеристики протягом усього терміну придатності.

Для виробництва шинок вареної та варено-копченої використано штучні білкові оболонки «Білкозин». Їхніми перевагами є

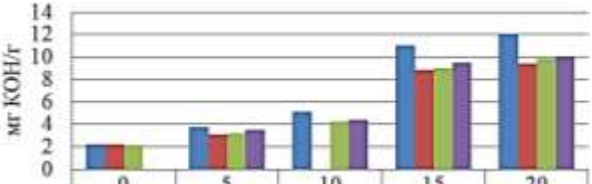
еластичність, забезпечення стабільності діаметру, зберігання форми виробу під час охолодження та у процесі зберігання, висока паро- та газопроникність, отримання традиційного смаку та натурального вигляду продукту. Куряча шкурка була використана для запеченої шинки. Із метою захисту готових виробів від окислювального псування використовували олеорезини римського кмину та білого перцю. Їхня дія спрямована на блокування активних радикалів у ланцюгових реакціях окиснення. Окислення ліпідів починається в субклітинних мембранах у фракції високоненасичених фосфоліпідів. Здатність до окислення ненасичених жирних кислот, особливо із двома і більше подвійними зв'язками, під час зберігання призводить до прогіркання і погіршення кольору м'яса. Зміни якості шинок проходять за взаємопов'язаними напрямами – окисні, мікробіологічні й фізичні процеси. Виходячи із цього, ми дослідили зміни показників окиснення жиру та мікробіологічних показників шинок під час зберігання.

Гідролітичні та окиснювальні перетворення ліпідів, що відбуваються за тривалого зберігання, переважно не мікробного походження. Проте в ліполітичних бактеріях, плісені та інших мікроорганізмів містяться ферментні системи, що спричиняють гідролітичні та окиснювальні перетворення ліпідів. Ліпази цих мікроорганізмів активно каталізують гідроліз ліпідів. Найбільш чутливими до окиснювального перетворення є ненасичені жирні кислоти та насичені жирні кислоти з коротким ланцюгом. Високомолекулярні жирні кислоти стійкіші до таких перетворень.

Під час зберігання відбувається гідролітичний розпад, глибина якого визначається вмістом вільних жирних кислот і характеризується величиною кислотного числа. Гідролізований жир добре засвоюється організмом людини, однак при глибокому гідролізі жирні кислоти, що утворюються у великій кількості, сприяють розвитку окисних процесів. Під час дослідження вмісту летких жирних кислот вироби вважають свіжими, якщо вміст летких жирних кислот становить до 4,5 мгКОН/г, сумнівної свіжості – 4,9 до 9 мгКОН/г, несвіжими – більше 9 мгКОН/г.

Під час зберігання шинок за температури 0…6 °С накопичення летких жирних кислот активно спостерігалось на 10 добу, де вони мали сумнівну свіжість, а після 15 діб – зіпсувались. Накопичення летких жирних кислот у контрольному зразку зростає від 5,1±0,03 до 11±0,01 мг КОН/г.

Після 10 доби зберігання копчено-варена та варена шинки набули показника сумнівної свіжості – 4,2±0,04 та 4,4±0,02, а після 15 діб зберігання кількість летких жирних кислот зросла до 9,0±0,02 та 9,5±0,02, вироби були зіпсовані (рисунок 2).



	0	5	10	15	20
Контроль	2,2	3,7	5,1	11	12
Шинка запечена	2,2	3,1	0	8,8	9,4
Шинка копчено-варена	2,1	3,2	4,2	9	9,8
Шинка варена	0	3,5	4,4	9,5	10

Рисунок 2. Динаміка зміни летких жирних кислот ліпідів шинок під час зберігання, мгКОН /г

Шинка, упакована під вакуумом цілими виробами, на початку експерименту була свіжою. Вміст летких жирних кислот у контролі становив 2,5±0,01 мгКОН /г у шинці запеченій і копчено-вареній – 2,2±0,01, у шинці вареній – 2,4±0,01 мг КОН /г. Ріст кількості летких жирних кислот помітний на 10 та 15 день зберігання, що відповідає їх сумнівній свіжості, зокрема в контролі їх вміст становив 5,2±0,01 та 8,5±0,02 відповідно, у шинці запеченій– 4,6±0,02 та 5,5±0,02, шинці копчено-вареній– 4,8±0,01 та 6,2±0,01, шинці вареній – 4,9±0,02 та 7,1±0,01 мгКОН /г. Тобто на 5 добу зберігання усі дослідні шинки були свіжими.

За результатами досліджень встановлено, що вироби були зіпсовані після 20 днів, окрім шинки запеченої, яка була сумнівної свіжості, вміст летких жирних кислот становив 8,9±0,02 мгКОН/г. Накопичення летких жирних кислот контрольного зразка переважає їх вміст у шинці запеченій на 25% та становить 12,2±0,01 мгКОН/г; у шинках копчено-вареній та вареній цей показник становить 19,7±0,02 та 10,9 ±0,01 мгКОН /г (рисунок 3).

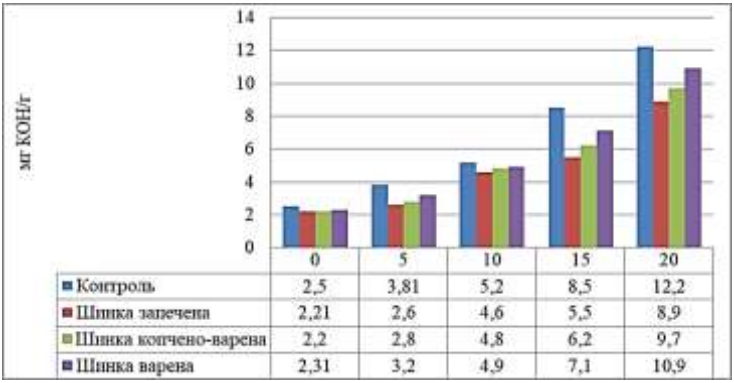


Рисунок 3. Динаміка зміни летких жирних кислот ліпідів шинок, упакованих під вакуумом, мгКОН /г

Зміни кислотного числа шинок, що зберігались у холодильних умовах, можна прослідкувати після 10 доби зберігання. За зміною значення цього показника після 15 діб можна стверджувати про псування виробів.

У контрольному зразку кислотне число на 5 добу зберігання становить 3,6±0,01, а на 15 добу – 6,2±0,02 мг КОН /г. У дослідних зразках цей показник нижчий, ніж у контролі на 5 добу зберігання (мгКОН/г): шинка запечена – 36%, шинка копчено-варена – 33,3%, шинка варена – 25% (рисунок 4).

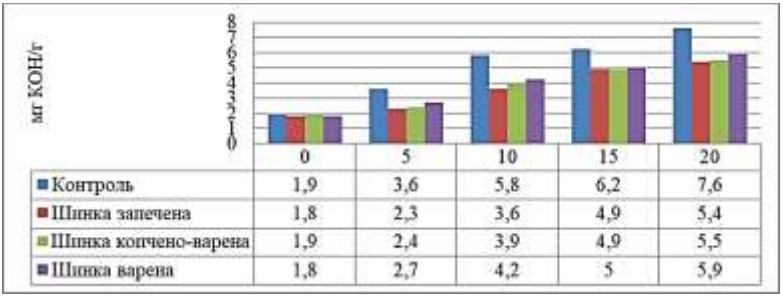
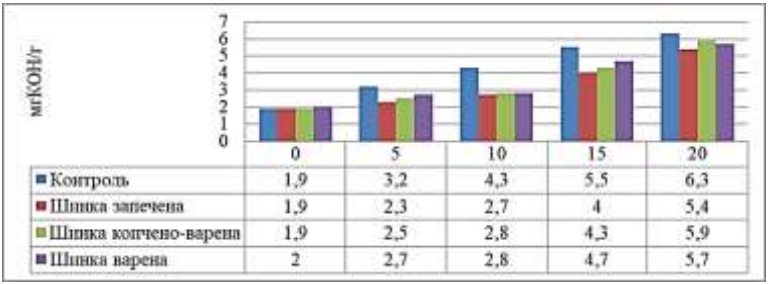


Рисунок 4. Динаміка зміни кислотного числа ліпідів шинок, упакованих під вакуумом, мгКОН /г

Після 10 діб зберігання процеси окиснення жирів найбільш інтенсивно проходять у контрольному зразку, що свідчить про його псування (4,3±0,03 мг КОН/г), у дослідних зразках через 15 діб зберігання кислотні числа знаходяться в межах 4,9±0,04 та 5±0,01 мг КОН /г, тобто зіпсовані.

У шинці запеченій, упакованій під вакуумом під час проведення досліджень, кислотне число було нижчим, ніж у контролі, і становило на 5 добу зберігання у шинці запеченій – 2,3±0,02, у шинці вареній – 2,7±0,01, на 10 добу – 2,7±0,01 та 2,8±0,02, на 15 добу – 4,0±0,01 та 4,7±0,01. У запеченій шинці кислотне число було меншим, ніж у контролі і шинках з різною термічною обробкою (рисунок 5).



	0	5	10	15	20
Контроль	1,9	3,2	4,3	5,5	6,3
Шинка запечена	1,9	2,3	2,7	4	5,4
Шинка копчено-варена	1,9	2,5	2,8	4,3	5,9
Шинка варена	2	2,7	2,8	4,7	5,7

Рисунок 5. Динаміка зміни кислотного числа ліпідів шинки, мгКОН/г

Перебіг окислювальних процесів у контрольному зразку проходить інтенсивніше. Дослідні зразки шинок зберігають свої якісні показники, їх пероксидне число після 5 діб зберігання на 60% менше, ніж у контролі, після 10 діб – на 50% менше, ніж у контролі, і після 15 діб зберігання – в середньому на 30%. Під час збільшення пероксидного числа жиру у шинках з'являються ознаки прогіркання смаку і неприємного запаху в процесі значенні пероксидного числа жиру 0,2% J_2.

Зміни пероксидного числа жиру досягають максимальних показників, за якими можна підтвердити псування виробів після 15 діб зберігання за температури 0…6°С у всіх дослідних зразках, вони знаходяться в межах від 0,11±0,04 до 0,12±0,02 %J_2..

Після 20 діб зберігання в усіх виробах спостерігається утворення перекисів, що призводять до ослизнення та зміни їх запаху.

У контрольному зразку пероксидне число становило 0,20±0,02%J_2., а в дослідних – від 0,15±0,03 до 0,18±0,04 %J_2 (рисунок 6).

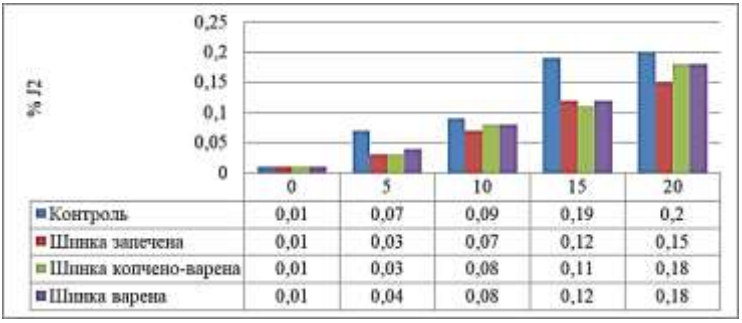


Рисунок 6. Динаміка зміни пероксидного числа ліпідів шинок, упакованих під вакуумом, %J_2

Однак за однакових умов і різного виду зберігання (використання вакуумного пакування) інтенсивність росту пероксидного числа не однакова. Так, через 5 діб зберігання в холодильних умовах значення пероксидного числа становило 0,05±0,01 %J_2 в контрольному зразку, а через 10 діб – 0,08±0,02% J_2, після 15 діб – 0,12±0,02 % J_2.

Пероксидне число жиру в дослідних зразках шинок значно менше, зокрема в запеченій після 5 діб зберігання воно становить (% J_2.) 0,02±0,02, після 10 діб – 0,04±0,03, після 15 діб – 0,08±0,01 (рисунок 7).

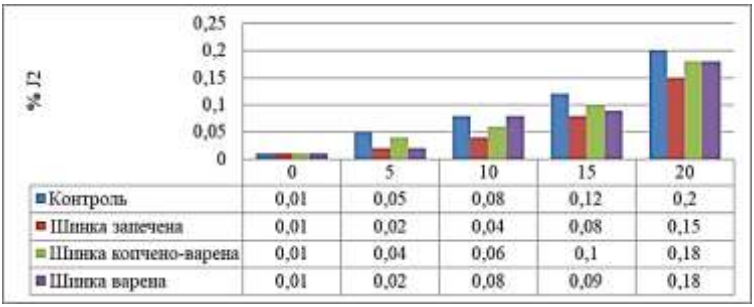


Рисунок 7. Динаміка зміни пероксидного числа шинок, упакованих під вакуумом, % J_2

На результати досліджень впливає вміст вологи у виробах, сировина, термічна обробка. Олеорезини, що входять до складу рецептури шинки, здатні призупиняти окиснювальні процеси готових виробів та подовжувати термін зберігання. Контрольний зразок рулету «Курячого» втратив свої якісні показники після 5 діб зберігання, а упакований під вакуумом – після 10 діб. Натомість усі дослідні зразки шинок характеризувались стабільними показниками якості. Процеси псування в них розпочались після 10 діб зберігання, упакованих під вакуумом – після 15 діб.

Дослідження шинок за показниками безпеки, зокрема мікробіологічними показниками, проводили після 15 діб зберігання за температури 0…6 ℃. Досліджували на вміст кількості мезофільно-аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів (таблиця 6). Бактерій групи кишкової палички (колі форми), *Staphylococcus aureus* в 1 г продукту, патогенних мікроорганізмів роду *Salmonella, L. monocytogenes* в 25 г продукту, сульфітредукувальних клостридій, бактерій роду *Proteus* в 0,1 г продукту не було виявлено.

Таблиця 6

Мікробіологічні показники шинок

Назва продукції	**Показники**	**Максимально допустимий вміст ДСТУ 4531:2006**	**Вміст за результатами досліджень**	**Відмітка про відповідність**
Контороль	кМАФАМ, КУО в 1 г продукту, не більша, ніж	$1x10^3$	$1,9x10^3$	не відповідає
Шинка запечена	кМАФАМ, КУО в 1 г продукту, не більша, ніж	$1x10^3$	$2,7x10^2$	відповідає
Шинка копчено-варена	кМАФАМ, КУО в 1 г продукту, не більша, ніж	$1x10^3$	$3,5x10^2$	відповідає
Шинка варена	кМАФАМ, КУО в 1 г продукту, не більша, ніж	$1x10^3$	$3,9x10^2$	відповідає

Кількості мезофільно-аеробних і факультативно-анаеробних мікроорганізмів (кМАФАМ) у контрольному зразку перевищив допустиме значення $1x10^3$ КУО в 1 г продукту і становив $1,9x10^3$, що не відповідає вимогам за цим показником та несе потенційну

небезпеку. Загальне бактеріальне обсіменіння дослідних зразків шинок знаходилось у межах норми, найменший показник було виявлено в шинці запеченій – $2,7x10^2$, КУО в 1 г продукту.

У результаті проведених досліджень встановлено, що вакуумна упаковка здатна подовжити термін зберігання продукту втричі, оскільки матеріали, з яких виготовляють поліетиленову упаковку, мають кращі бар'єрні властивості. Олеорезини, що входять до складу рецептури дослідних зразків шинок, володіють антиоксидантними властивостями та призупиняють розвиток мікроорганізмів у готових виробах.

ВИСНОВКИ

1. За амінокислотним і жирно-кислотним складом оптимізовано рецептуру делікатесного виробу – шинки (вміст м'яса індика – 65% та кроля – 35%) та утилітарністю її організмом.

2. Аналіз результатів усебічного оцінювання розроблених шинок за різних умов теплової обробки свідчить про достатньо високі їхні характеристики: фізико-хімічні, органолептичні, структуро-механічні, та високу біологічну цінність.

3. Встановлено вплив термічної обробки (варіння, коптіння та запікання) на збереження амінокислотного складу готового продукту в такій послідовності: шинка запечена, варена та копчено-варена.

4. Доведено підвищення відносної біологічної цінності розроблених шинок (на 28% порівняно з контролем). Ріст клітин інфузорії *Tetrahymena pyriformis* є свідченням позитивного впливу на засвоюваність продукту.

5. Встановлено, що зберігання шинок в оболонці «Білкозин» (варена та варено-копчена) та в курячій шкурі (шинка запечена) впродовж 5 діб за температури 0…6 ℃ та 15 діб, додатково запакованих у вакуумній упаковці, не призводить до суттєвих змін органолептичних, фізико-хімічних і мікробіологічних показників.

6. Результати досліджень мікробіологічних показників повністю підтверджують отримані дані щодо кислотного числа та пероксидного числа під час зберігання розроблених шинок.

АНОТАЦІЯ

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність використання в технології делікатесних м'ясних виробів (шинок) дієтичного м'яса індика та кроля з метою покращення біологічної цінності, технологічних та органолептичних показників якості, гальмування деструктивних перетворень у процесі

зберігання готового продукту з використанням різних пакувальних матеріалів. У зв'язку з недостатньою науковою інформацією щодо комбінування м'яса індиків та кролів у технології делікатесних продуктів спеціального призначення детальне вивчення хімічного складу, фізико-хімічних, функціонально-технологічних властивостей, структуро-механічних характеристик розроблених шинок за різних методів термічного обробляння (варіння, коптіння та запікання) та показників динаміки змін у процесі зберігання має соціально-економічне значення для подальшого впровадження даної технології на підприємствах м'ясної галузі України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Peshuk L.V., Galenko O.O., Budnik N.V. Use of collagenase in technology gerodietetic products. *Journal of food and packing science, technique and technologies*. 2014. 2 (3). P. 8–11.
2. Пешук Л.В., Гащук О.І, Москалюк О.Є. Інноваційні м'ясні продукти. *Харчова промисловість*. 2015. 17. С. 64–67.
3. Simonova I., Peshuk L. Galenko J. Microscopic examinayion of chops with content of lentil flour. Ukranian Journal of Food Science. 2019. Volume 7. Issue 1. P.16-26. DOI: 10.24263/2310-1008-2019-7-1-4.
4. Brenes A., Viveros A., Chamorro S., Arija I. Use of polyphenol-rich grape by-products in monogastric nutrition. A review. *Animal Feed Science and Technology*. 2016. Volume 211. P. 1–17. DOI.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.016.
5. Dal A., Simona B., Marco C. M., Szendrő Z., Gerencsér Z., Matics Z., Castellini C., Szin M., Zotte A. Effect of diet and packaging system on the oxidative status and polyunsaturated fatty acid content of rabbit meat during retail display. *Meat Science*. 2018. Volume 143. P. 46–51. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.004.
6. Спосіб виробництва сиров'ялених продуктів із м'яса індиків і кролів «Торіно»: пат. на винахід 104679 Україна: МПК 51 А 23 С. 11 /00 / Пешук Л.В., Дидюк О.Ю., Дубяга О.М; власник НУХТ. № а201214239; заявл. 13.12.2012; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 10.
7. José Manuel. Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Meat Science*. 2016. Volume 121. P. 175–181. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.018
8. Cullere M., Dalle A., Zotte, Tasoniero G., Giaccone V., Szendrő Z., Szín M., Odermatt M., Gerencsér Z., Dal Bosco A., Matics Z. Effect of diet and packaging system on the microbial status, pH, color and sensory traits of rabbit meat evaluated during chilled storage.

Meat Science. 2018. Volume 141. P. 36–43. DOI.org/10.1016/ j.meatsci.2018.03.014.

9. Mancini S., Nuvoloni R., Pedonese F., Paci G. Effects of garlic powder and salt additions in rabbit meat burgers: Preliminary evaluation. *Food processing and precervation*. 2019. Volume 133,3. P. 1–10. DOI.org/10.1111/jfpp.13894.

10. Ding Y., Lin H.-W., Lin Y.i-L., Yang D.-J., Yu Y.-S., Chen Jr.-W., Wang S.-Y., Chen Y.-C. Nutritional composition in the chia seed and its processing properties on restructured ham-like products. *Journal of Food and Drug Analysis.* 2018. Volume 26 (1). P. 124-134. DOI.org/10.1016/j.jfda.2016.12.012.

11. Youling J. J., Xiong L. Natural antioxidants as food and feed additives to promote health benefits and quality of meat products: *A review. Meat Science.* 2016. Volume 120. P. 107-117. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.005.

12. Mattioli S., Dal Bosco A., Szendrő Zs., Cullere M., Gerencsér Zs., Matics Zs., Castellini C., Dalle Zotte A. The effect of dietary Digestarom herbal supplementation on rabbit meat fatty acid profile, lipid oxidation and antioxidant content. *Meat Science*. 2016. Volume 121. P. 238–242. DOI.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.024.

13. Dalle A., Zotte C., Celia Zs., Szendrő. Herbs and spices inclusion as feedstuff or additive in growing rabbit diets and as additive in rabbit meat: A review. *Livestock Science.* 2016. Volume 189. P. 82–90. DOI.org/10.1016/j.livsci.2016.04.024.

14. Маркович І.І. Зміни мікробіологічних показників напівкопчених ковбас у процесі зберігання. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2015. № 3. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2015_3_18.

15. Drachuk U., Simonova I., Halukh B., Basarab I., Romashko I. The study of lentil flour as a raw material for production of semi-smoked sausages. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2018. № 6. 11(96). P. 44–50. DOI:10.15587/1729-4061.2018.148319.

Information about the authors:
Peshuk L. V.,
Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor

Simonova I. I.,
Candidate of Technical Sciences,
Department of Technology of Meat, Oil and Fat Products
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies
50, Pekarska str., Lviv, 79010, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.17

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION METHODS MULTICRITERIA EVALUATION OF EFFICIENCY ENERGY SAVING ACTIVITIES IN THE FIELD OF HEAT SUPPLY

Polyvianchuk A. P., Belousov I. V., Semenenko R. A.

INTRODUCTION

In recent years, a significant number of cities in Ukraine, in particular, Kyiv, Kharkiv, Lviv, Ternopil, Chernivtsi and others. have joined the Covenant of Mayors on Climate and Energy[1], which provides for the holding municipal authorities measures to significantly reduce greenhouse gas emissions by 30% by 2030. Achieving this result requires a new strategy for the use and development of the municipal energy system, which envisages increasing the environmental safety of boiler plants and thermal power plants through the introduction of innovative high-efficiency energy-saving, environmental and economically sound technologies[2]. This strategy should take into account such problems of the Ukrainian economy as: outdated technologies and equipment for thermal energy production, high energy consumption and material costs exceeding 2-3 times the corresponding indicators of developed countries; lack of modern environmental protection systems, lack of appropriate legal and economic mechanisms that would encourage the development of environmentally friendly technologies, environmental protection techniques, etc.[3] At the same time, stimulating the effective consumption of thermal energy by users will allow reduce

[1] The Covenant of Mayors for Climate and Energy Reporting Guidelines / Covenant of Mayors & Mayors for climate and energy. Adapt Offices and the Joint Research Centre of the European Commission, 2016. 78 p.

[2] Alibekova A., Shaimerdenova G., Agilbaeva M. Ecolodica problems of thermal power plants. *Journal of Industrial Technology and Engineering*. 2013. Вип. 4(09). Pp. 40–44.

[3] Варламов Г.Б., Дідик І.С. Основні особливості реалізації принципу екологічної рівноваги на екологічному об’єкті. *Молодий вчений*. 2016. Вип. 1, Ч. 3. С. 104–107.

the resource consumption of urban heating networks, which will reduce environmental pollution and reduce greenhouse gas emissions[4].

Actual scientific task that confronts the communal sector of the economy today is to increase the informative methods for assessing the effectiveness of measures energy saving in the areas of heat supply and heat consumption. To solve this problem, the effectiveness of the measures under study should be considered as a complex value, which takes into account the energy, environmental and economic consequences of their implementation.

The purpose of this work was to create and practical implementation method of multicriteria assessment of the effectiveness of energy saving measures with thermal energy of buildings by indicators of energy, environmental and economic effects. To achieve this goal, the following *tasks* were solved:

1) the creation of a multi-criteria method for evaluating the effectiveness of energy conservation measures in the field of heat supply;

2) realization of the created method for assessing the effectiveness of energy-saving measures recommended for implementation at full-scale facilities.

1. The method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of energy-saving measures

The essence of this method is that the overall effectiveness of energy-saving measures is considered as a 3-component vector E, components of which are energy – E_I, environmental – E_{II} and economic – E_{III} effects of their implementation (Fig. 1).

[4] Маляренко В.А., Щербак І.Є. Аналіз споживання паливно-енергетичних ресурсів України та їх раціонального використання. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2013. Вип. 14(988). С. 118–126.

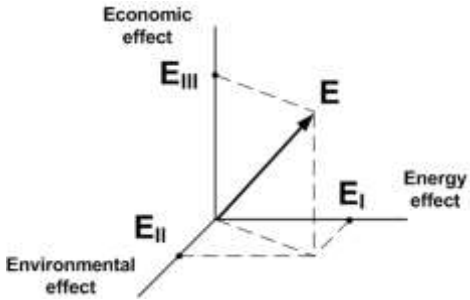


Fig. 1. Components of the overall effectiveness of energy conservation measures in the field of heat supply

At the same time, the following indicators are used to assess these components of overall efficiency:

– for *energy effect* E_I: absolute – ΔQ (kW·h) and relative – δQ (%) value of the saved amount of thermal energy for the heating period, which are determined by the formulas:

$$\Delta Q = Q_{tot1} - Q_{tot2}\,, \tag{1}$$

where Q_{tot1} and Q_{tot2} are the total heat losses due to the building enclosure during the heating period before and after the implementation of energy-saving measures, respectively, kWh;

$$\delta Q = \frac{Q_{tot1} - Q_{tot2}}{Q_{tot1}} \cdot 100\%\,; \tag{2}$$

– for *environmental effect* E_{II}: mass (volume) of fuel saved – ΔM_{fuel} (kg) (ΔV_{fuel} (m^3)), reduction of mass of greenhouse gas emissions, in particular – of CO_2 and pollutants – ΔM_p (kg):

$$\Delta M_{fuel} = 3,6 \cdot \frac{\Delta Q}{Q_l}\,, \tag{3}$$

where Q_l – the lower heat of combustion of the fuel, MJ/kg;

$$\Delta V_{fuel} = \frac{\Delta M_{fuel}}{\rho_{fuel}}, \quad (4)$$

where ρ_{fuel} – density of fuel, kg/m^3;

$$\Delta M_{3P} = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot K_P \cdot \Delta Q, \quad (5)$$

where K_P – coefficient pollutant emissions[5], g/GJ;

– for *economic effect* E_{III}: reduction of payment for the amount of heat consumed during the heating period - ΔC_{hc} (UAH) and for fuel - ΔC_{fuel} (UAH):

$$\Delta C_{hc} = 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot c_{hc} \cdot \Delta Q, \quad (6)$$

where c_{hc} – the cost of a unit of thermal energy according to the set tariffs[6], UAH/Gcal;

$$\Delta C_{fuel} = 10^{-3} \cdot c_{fuel} \cdot \Delta V_{fuel}, \quad (7)$$

where c_{fuel} – the cost of fuel according to the set tariffs, UAH/ton or UAH/ths. m^3.

At assessment energy effect criteria EI total heat loss fluxes across enclosing building structure – Q_{tot1} i Q_{tot2} are determined using the formula[7] (Fig. 2):

$$Q_{tot} = \left(\sum_{i=1}^{4} k_i \cdot F_i + c \cdot M_{inf} \right) \cdot \left(t_{in} - t_{out} \right) = k_{hl} \cdot \left(t_{in} - t_{out} \right), \quad (8)$$

where k_i – the heat transfer coefficient through the ith fencing structure, W/(m^2·K)); F_i – the surface area of the i-th fencing structure,

---

[5] Купалова І. Визначення обсягів викидів стаціонарними джерелами. *Вісник. Офіційно про податки*. 2016. Вип. 32(889). С. 32–37.

[6] Тарифи на теплову енергію для бюджетних установ. КП «Харківські теплові мережі». URL : http://www.hts.kharkov.ua/KPHTS_v2_public_info_tarify.php.

[7] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учебник для вузов. Энергия, 1975. 488 с.

m^2; c – specific heat of air, J/(kg·K); M_{inf}– mass air flow rate at infiltration, kg/s; t_{in} – indoor air temperature, ºC; t_{out} – outside air temperature, ºC.

k_{hl} – heat loss coefficient, that is determined by the formula

$$k_{hl} = \sum_{i=1}^{4} k_i \cdot F_i + c \cdot M_{inf} . \quad (9)$$

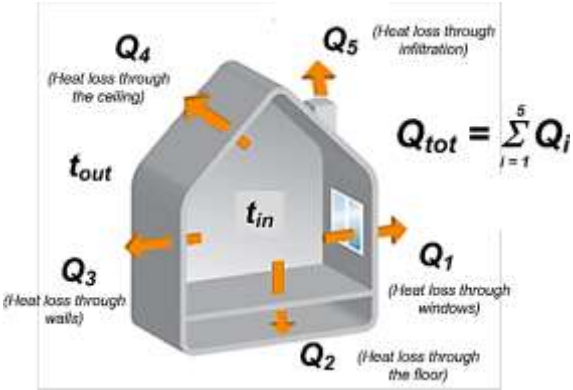


Fig. 2. Ingredients total heat losses through enclosure structures building

The presented method provides for the possibility of increasing performance indicators by adding new indicators in the components of overall efficiency. In particular, to the metric group, characterizing the economic effect of an energy-saving measure can be added to the payback period of capital investments.

2. Evaluation of the effectiveness of energy-saving measures recommended for full-scale object № 1

Description of the object of research. As full-scale object № 1 a fragment of the administrative building was chosen for research O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (O.M. Beketov NUUE), in which are located: a lecture hall, a laboratory, a conference hall and offices of the university administration. This is a three-story building with two external walls and two internal walls adjacent to heated rooms with a total heated area of 225.3 m^2 (Fig. 3).

Fig. 3. Full-scale object № 1 for studying the efficiency of heat consumption

As a result of a full-scale survey of buildings, the structural parameters of the building envelope necessary for thermal calculations were obtained. According to witnesses, the average actual cost of the specific heat consumption for the entire administrative building in the heating season of 2019 was q_{averag} = 97.5 kWh/m^2. The selected part of the building has two external walls and window openings facing north. The ratio of the total area of window openings to the area of external walls significantly exceeds the average for the entire building. Based on this, it can be assumed that the value of the specific heat consumption in the selected section of the building will exceed the average value of the specific heat consumption for the entire building in accordance with the readings of the counters. The average temperature inside the building during the heating season of 2019 was t_{in} = 18°C.

Investigated energy conservation event. For full-scale object № 1 recommended use smart home technology for control thermal modes building premises using the HERZ Smart Comfort automated system[8]. This system is a kit of components for controling the thermal mode of premises using a smartphone. The kit includes (Fig. 4):

[8] HERZ Smart Comfort: дистанционное управление комфортом дома. URL : https://voltar.com.ua/news/herz-smart-comfort-distantsionnoe-upravlenie-komfortom-doma.html.

– electronic heat regulators ETKF +;
– window opening sensor;
– room thermostat;
– switching module Cube +;
– thermal switch Eco SWITCH +.

Using the HERZ Smart Comfort system is as follows. All radiators in the building are equipped with electronic heat control ETKF +. A programmable room thermostat is installed in each room, which measures the temperature in the room and gives commands to the heat regulators to open or close them. You can directly control the electronic thermal regulator in accordance with the temperature of the air in the room, however, its efficiency decreases at the same time, since the regulator is installed directly on the radiator and curtains, direct sunlight, and other factors can affect its operation. The room thermostat can be installed at the optimum height, where external factors will not affect it. Each window must have a window open sensor installed. To control thermostats using a smartphone, the system must be equipped with a Cube + module, which is located next to the router and provides an Internet connection. The Eco SWITCH + thermal mode switch is used alone for a full-scale object, it is installed in the corridor and turns on when the last employee leaves the building.

Fig. 4. Key elements of the HERZ Smart Comfort automated system

Automated control for thermal modes building premises is as follows. A room thermostat measures the temperature in the room and through the heat controllers changes the amount of coolant passing through the radiator. When a window opens in a room, the window open sensor is activated and the room temperature is automatically maintained at 17°C (factory setting) or at another level set by the user. Using a wall thermostat, the hourly temperature change is set depending on the heat generation mode. For example, during the day from 8-00 to 17-00 in the event that no one is in the room, a temperature of 16° C can be set, which returns to 22° C after 17-00. In general, during the day you can set 6 tuned thermal conditions in the rooms. At the same time, these modes can be controlled using a smartphone on which special software is installed.

Justification of the expediency of using an energy-saving measure.

Advantages of HERZ Smart Comfort. The main factor ensuring the effectiveness of this heating system in the rational use of thermal energy is the dynamism of control. The temperature in each room is maintained exactly as needed at the moment, which provides HERZ Smart Comfort.

Features of HERZ Smart Comfort:

– the temperature is controlled and controlled in each room;

– it is possible to control the heating using a smartphone or laptop via the Internet;

– automatic temperature change in the room is provided at certain intervals (up to 6 periods per day);

– it is possible to remotely control the temperature in the premises when changing preset settings;

– minimized heat loss during ventilation.

According to the manufacturer of building heating control using the HERZ, Smart Comfort system saves up to 60% of thermal energy.

Evaluation of the effectiveness of the implementation of energy-saving measures. As a result of the analysis of the actual need of the building's premises for comfortable heat baking, at which the indoor air temperature – t_{in}^{comf} is maintained at 20° C, the indicator of the building's relative need for comfortable heat supply – γ_{comf} was determined (Fig. 5):

$$\gamma_{comf} = \sum_{i=1}^{3} \frac{S_{hai}}{S_{ha}} \cdot \gamma_{comfi} = \frac{79,2}{225,3} \cdot 0,18 + \frac{68,4}{225,3} \cdot 0,02 + \frac{77,7}{225,3} \cdot 0,27 = 0,16\,, \quad (10)$$

where S_{hai} – the heating area of the i-th floor of the building, m^2; γ_{comfi} – relative need for comfortable heat supply of the i-th floor:

$$\gamma_{comfi} = \frac{\tau_{h(w)i}}{\tau_{h(w)}}, \quad (11)$$

where $\tau_{h(w)i}$ – the average weekly duration of the period of comfortable heat supply during the heating season for the i-th floor, h; $\tau_{h(w)}$ – duration of one week period – 168 hours.

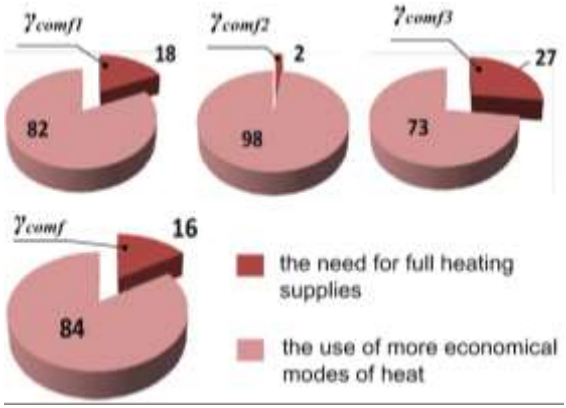


Fig. 5. The results of the analysis of the needs of the premises of the facility № 1 in a comfortable heat supply

In further calculations, it was assumed that in rooms requiring a comfortable warmth, the HERZ Smart Comfort system supports a comfortable thermal mode with a temperature of t_{in}^{comf}, and in other rooms – an economical mode with a temperature of t_{in}^{econ}, which is 4°C lower than t_{in}^{comf} and equal to 16°C[9].

Indicators of energy efficiency from the use of the system of regulation of thermal modes of premises of a full-scale object № 1 were determined by the formulas (without taking into account the thermal inertia of the building):

[9] Polivyanchuk A., Kovalenko Y. Improving the efficiency of thermal energy use when heating buildings through the introduction of technologies «smart home». Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія «Екологія», 2018. Вип. 19. С. 119–126. DOI: 10.26565/1992-4259-2018-19-12.

$$\delta Q = \left(1 - \gamma_{comf}\right) \cdot \frac{t_{in}^{comf} - t_{in}^{econ}}{t_{in}^{comf} - t_{out(a)}} \cdot 100\% = \\ = \left(1 - 0.16\right) \cdot \frac{20 - 16}{20 - \left(-0.8\right)} \cdot 100\% = 17\%, \quad (12)$$

where $t_{out(a)}$ = -0.8 ºC - average air temperature in Kharkiv for the heating period 2019;

$$\Delta Q = \left(q \cdot S_{ha}\right) \cdot \frac{\delta Q}{100} \cdot 10^3 = \left(97,5 \cdot 225,3\right) \cdot \frac{17}{100} = 3734 kW \cdot h, \quad (13)$$

where q = 97.5 (kW·h)/m^2 is the actual specific heat consumption of the administrative building of O.M. Beketov NUUE in 2019 year.

According to formulas (4) – (7), the *indicators of environmental and economic effects* from the implementation of the energy saving measure for the heating period were determined, which were:

– reduction of natural gas consumption for heating - ΔV_{fuel} = 406.4 m^3;

– reduction of CO_2 and NO_x emissions into the atmosphere – ΔM_{CO2}= 789.1 kg; ΔM_{NOx} = 0.86 kg;

– reduction of the payment for the use of thermal energy and fuel ΔC_{hc} = 4441 UAH and – ΔC_{fuel} = 4041 UAH.

On the basis of the full-scale object № 1, which was considered as a physical model larger buildings and other types of buildings, an evaluation was carried out efficiency of the HERZ Smart Comfort system in all premises of the administrative building (heating area 5821 m^2), all buildings of the university (heating area 51186 m^2) and fragments of hospital and apartment buildings, the heating areas of which are the same as those of the full-scale object (Figs. 6, 7).

The results of the realization of the method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of energy-saving measures has proved its information content and the possibility of using it during in mathematical and physical modeling of the ecological and energy state of the studied objects.

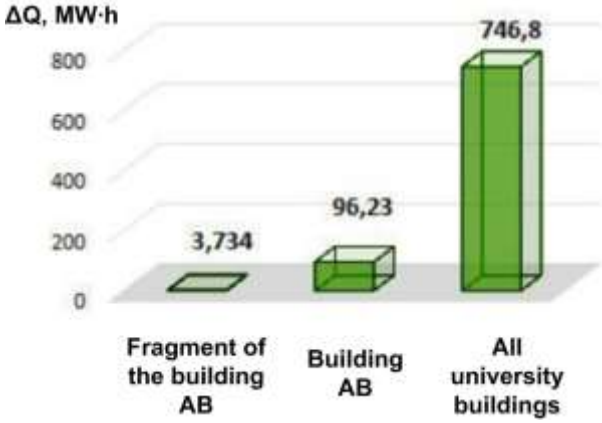


Fig. 6. Results of energy assessment effect energy saving event in O.M. Beketov NUUE

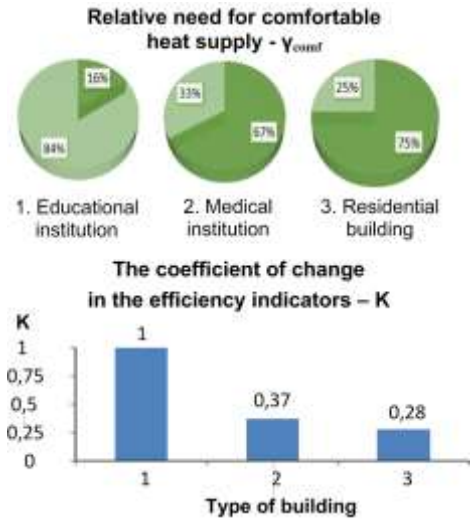


Fig. 7. Results of evaluating the effectiveness of using the HERZ Smart Comfort system in buildings of various types

3. Evaluation of the effectiveness of energy-saving measures recommended for full-scale object № 2

Description of the object of research. The building of the Communal Institution "Kharkov Palace of Children and Youth Creativity" (CI KhPCYC) 1993 of the building, which consists of two buildings and has a multi-level complex T-shape (Fig. 8), was chosen as a full-scale object № 2 for research. According to the project documentation for the building: its construction volume is 80 375 m^3, the total area of the building is 15 159 m^2; usable area 13 712 m^2; the projected consumption of thermal energy for heating 1 m^2 of the total area is 183 W/m^2.

Fig. 8. General view of a full-scale object № 2

The heating of the building for the needs of heating and hot water supply is provided from the thermal networks of the enterprise of the communal enterprises "Kharkiv Thermal Networks". The actual heat consumption of a building in Gcal, averaged over 4 years, is as follows: annual – 1870.3; monthly:

January – 429.6;	May – 41.8;	September – 21.1;
February – 378.6;	June – 11.0;	October – 128.3;
March – 241.2;	July – 0.0;	November – 286.2;
April – 104.2;	August – 1.7;	December – 226.7.

Investigated energy conservation measures. For full-scale object № 2, the use of 2 energy-saving measures is recommended: controlling the thermal conditions of the building's premises with the HERZ Smart Comfort system (described above) and using an alternative source of heat supply – heliosystems. Elements of the solar system are solar collectors that convert the thermal energy of the sun into the heat energy

of the heat carrier, which ensures the functioning of heating systems and hot water supply of the building of the CI KhPCYC building and, if necessary, other buildings. In the heliosystemy, it is recommended to use modern, energy-efficient, flat-type solar collectors, such as the Buderus (Germany) SKT 1.0[10] series collectors (Fig. 9) or similar devices.

Fig. 9. Structure and technical characteristics of solar collector - SKT 1.0

The shape of the possible location of the heliosystems with a total area of 1080 m^2 is located on the south side of one of the buildings of the CI KhPCYC (Fig. 10).

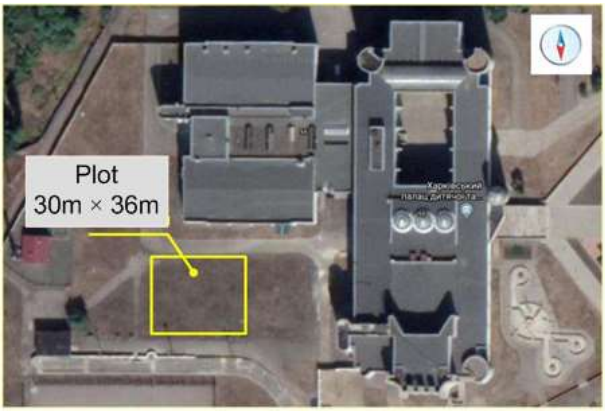


Fig. 10. The shape of the possible location of the heliosystem

[10] Плоскі сонячні колектори Logasol SKT 1.0. Будерус Україна. URL : https://www.buderus.ua/products/solar/skt10.html.

On the recommended site in accordance with established requirements[11] 180 collectors of the recommended type can be placed: 3 rows of 60 pieces (Fig. 11).

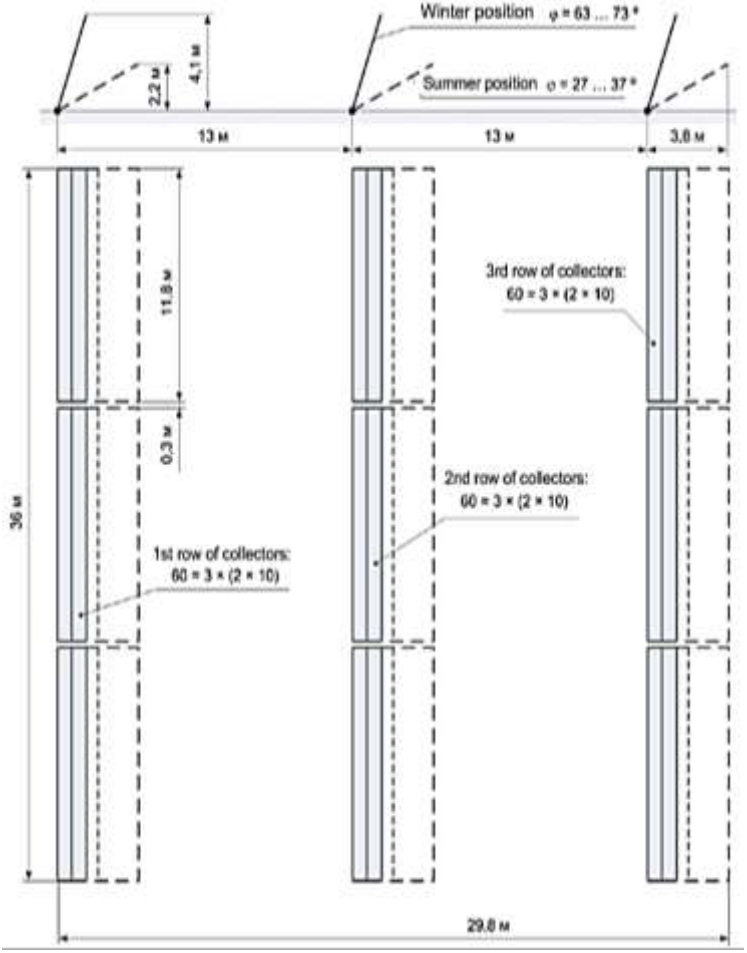


Fig. 11. Scheme arrangement of rows of solar collectors with 180 = 3 × 60 panels

[11] Вовчак В., Тесленко О., Самченко О., Сушкова Д. Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України. Керівництво з відбору технологій / Під ред. С. Єрмілова. «Поліграф плюс», 2016. 134 с.

To ensure maximum thermal power of solar collectors (table. 1) it is recommended to adjust the angle of inclination of their panels to the earth's surface in the range of 27 ... 73 º (table. 2).

Table 1

The value of the specific average monthly thermal power of solar collectors in the Kharkiv – E_s climate zone, kW·h/(m^2·day)

Month of the year												Year
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	
1.19	2.02	3.05	3.92	5.38	5.46	5.56	4.88	3.49	2.10	1.19	0.90	3.26

Table 2

Value of optimum tilt angles of solar collectors

Month	**Geographic latitude of the area**							
	45ª	**46ª**	**47ª**	**48ª**	**49ª**	**50ª**	**51ª**	**52ª**
1. January	66ª	67ª	68ª	69ª	70ª	71ª	72ª	73ª
2. February	58ª	59ª	60ª	61ª	62ª	63ª	64ª	65ª
3. March	47ª	48ª	49ª	50ª	51ª	52ª	53ª	54ª
4. April	36ª	37ª	38ª	39ª	40ª	41ª	42ª	43ª
5. May	26ª	27ª	28ª	29ª	30ª	31ª	32ª	33ª
6. June	22ª	23ª	24ª	25ª	26ª	27ª	28ª	29ª
7. July	24ª	25ª	26ª	27ª	28ª	29ª	30ª	31ª
8. August	32ª	33ª	34ª	35ª	36ª	37ª	38ª	39ª
9. September	43ª	44ª	45ª	46ª	47ª	48ª	49ª	50ª
10. October	55ª	56ª	57ª	58ª	59ª	60ª	61ª	62ª
11. November	64ª	64ª	65ª	66ª	67ª	68ª	69ª	71ª
12. December	68ª	69ª	70ª	71ª	72ª	73ª	74ª	75ª

Justification of the expediency of using an energy-saving measure

Recently, the interaction between energy and the environment has become dangerous character. Burning and heat energy installations carry out chemical pollution of the environment by emissions of harmful substances, first of all nitrogen and sulfur oxides, greenhouse gas emissions – CO_2, CO those others, ash and soot emissions, which are steadily exacerbating environmental problems due to incareased production.

The growing technogenic burden on the environment and the exacerbation of these environmental security issues require an immediate change in environmental policy and the sustainable development of ecology in the future, energy and the economy. The solution to this problem is made possible by a clear optimization of the structure of the

energy balance of the country, in which the largest share should be ecologically safe energy sources from renewable energy sources.

Traditional energy today accounts for at least 30% of all atmospheric emissions. Of the total emissions, about 30% are solids, more than 60% sulfuric anhydride, and about 55% nitrogen oxides. In these conditions, the integration of energy and ecology, close interrelation of ecological aspects of energy with energy aspects of ecology is important in the region[12]. The implementation of such integration is in accordance with the concept of sustainable development of society, whose main purpose is to ensure the high quality of life of present and future generations on the basis of a balanced solution to the problems of economic development, conservation of the natural environment, rational use and reproduction of the planet's natural resource potential.

An analysis of the development strategy of the EU energy sector shows that between 2020 and 2030, the relative shares in the energy balance of primary energy sources of fuels such as oil and solid fuels will decrease by 0,4% (from 35.7 to 35,3%)) and 0,7% (from 17,4 to 16%), respectively, of natural gas – will not change – 25,7%, and the share of renewable energy sources will increase by 3,1% (from 9,9% to 12,0%). Thus, the contribution to the energy balance of traditional energy sources will be reduced over the years, which will lead to an increase in their cost, while, on the contrary, renewable energy sources will increase significantly[13].

One of the promising areas of energy resource conservation is the utilization of solar energy due to the depletion of world oil and gas reserves, as well as the problem of environmental pollution by solid fuel combustion products. The technology of utilization of solar energy, which is most prepared for the implementation of public utilities needs, is water heating by solar energy. Ukraine's National Energy Strategy for the period up to 2030 envisages a gradual increase in the production of equipment for solar hot water supply and heating systems, and it is also planned to install about 2 million m^2 of solar collectors, which will allow to obtain tangible savings. Experience in operating these systems has shown that 1 m^2 of solar collector under optimal operating conditions

---

[12] 14. Дорогунцов С.І., Коценко К.Ф., М.А. Хвесик. Екологія: підручник. КНЕУ, 2005. 104 с

[13] Прутська О.О., Федик О.Ю. Сучасний стан та проблеми розвитку альтернативної енергетики в Україні. *Збірник наукових праць ВНАУ*. 2012. Вип. 1(56). Т. 2. С. 158–164.

saves from 0.1 to 0.15 tons of conditional fuel during the summer season. Large-scale use of solar systems in Ukraine by 2030 will save up to 200 thousand within the adopted strategy of energy industry development Tons of conditional fuel[14].

Evaluation of the effectiveness of the use of the HERZ Smart Comfort system for controling the thermal modes of the premises of full-scale object № 2. An analysis of the needs of the premises of the CI KhPCYC building for comfortable heat supply showed that according to the duration of the actual use, they can be divided into 4 groups: around the clock; from 9.00 to 19.00 (except weekends) from 14.00 to 20.00; according to a special schedule (Fig. 12).

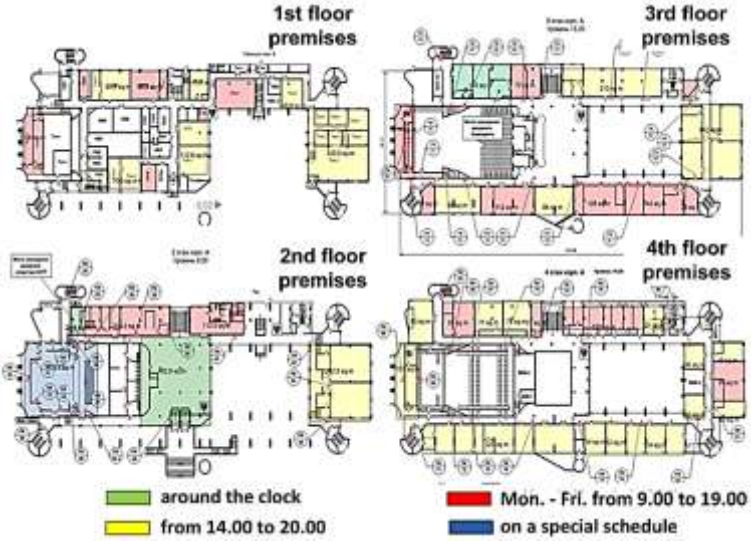


Fig. 12. The results of the analysis of the needs of the premises of the building CI KhPCYC in comfortable heat supply

In rooms that are not used around the clock, it is possible to introduce an economical mode of heat consumption by lowering the temperature during the absence of personnel and visitors. The calculation takes the

[14] Штен І. Аналіз конструкцій геліосистем гарячого водопостачання, які використовуються в Україні. *Збірник тез Міжнародної студентської науково-технічної конференції Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання*. 2018. Т. 1. С. 131–132.

average comfortable temperature in the room equal to 20° C. A temporary decrease in temperature is advisable if the room is not used for 10-12 hours or more, takes place in most educational and office buildings at night, on weekends and holidays. Temporary temperature reduction should not exceed 4° C in order to avoid violation of the humidity regime and the appearance of temperature deformations. It was assumed that the automatic control system for the thermal conditions of rooms provides a comfortable temperature only in rooms that are actually used by staff and visitors, in other rooms it maintains an economy mode temperature – less than 4° C from comfortable, that is 16° C. As initial data For research, the values of the heating areas of the building's premises and the results of the analysis of their need for comfortable heat supply were used (table 3, see Fig. 12).

Table 3

Classification of the premises of the full-scale object

Type of premises	**Usage mode**	**Area, m^2**	**The fate of the total area, %**
24-hour staff room	around the clock	1079	11,9
Administrative premises	Mon. - Fri. from 9.00 to 19.00	1382	15,3
Training rooms used in one shift	from 14.00 to 20.00	4208	46,6
Training rooms used in two shifts	from 8.00 to 18.00	390	4,3
450-seat auditorium	2 days a week from 9.00 to 18.00	615	6,8
Corridors	around the clock	1365	15,1
Total area	–	9033	100,0

The calculations took into account the current heat tariff (excluding VAT) at the time of the research. The thermal inertia of the building was not taken into account. It was believed that heat loss, tentatively proportional to the area of the room. Optimization of heat supply over time is supposed to be carried out in the whole building, with the

exception of rooms with round-the-clock staff stay. The following relationships were used in the calculations[15].

1. Actual heat energy consumption during the heating season:

$$Q_a = k \cdot F \cdot \Delta t_a, \quad (14)$$

where k – the heat transfer coefficient, W/m^2; F – area of walling, m^2; Δt_a – the difference between the room temperature and the average monthly outdoor temperature in the heating season 2018-2019, ^{o}C.

From the expression (14) follows

$$k \cdot F = \frac{Q_a}{\Delta t_a}. \quad (15)$$

2. Estimated heat energy consumption for the average monthly outdoor temperature of the heating season for the period 1981-2019. The use of thermal control (TC) is determined by optimizing the temporary temperature of the building:

$$Q_e = k \cdot F \cdot \Delta t_e = \frac{Q_a}{\Delta t_a} \cdot \Delta t_e, \quad (16)$$

where Δt_e – the difference between the internal and external temperatures for the average monthly temperatures of the heating season, ^{o}C.

3. Heat consumption after TC, Gcal:

$$Q_{TC} = \frac{Q_e \cdot \tau_{16} \cdot (\Delta t_e - 4)}{\Delta t_e \cdot \tau_w} + \frac{Q_e \cdot \tau_{20}}{\tau_w}, \quad (17)$$

where τ_{16} – the number of hours per week with a room temperature of 16°C, h; τ_{20} – the number of hours per week with a room temperature of 20°C, h; τ_w – the number of hours in a week, h.

The average monthly values of the actual consumption of thermal energy were adjusted taking into account the average monthly outdoor temperatures in Kharkov over a long period.

As the initial data for the calculations, we used the values of the average monthly actual consumption of thermal energy by the research object in the heating seasons of 2016–2019 (table 4).

[15] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учебник для вузов. Энергия, 1975. 488 с.

Table 4

Average monthly consumption of thermal energy by the building – Q_a, Gcal

Month	January	February	March	April	October	November	December
Thermal energy consumption	260,5	235,6	171,2	55,1	65,6	177,4	140,5

Based on the above ratios estimated the level of saved heat energy in all rooms of the CI KhPCYC building, which require optimization of the temperature regime. The calculation results (Fig. 13, table 5) indicate that the use of optimizing the temperature mode of the building by lowering the temperature during the absence of staff and visitors can save 130,3 Gcal or 11,1% of heat energy during the heating season.

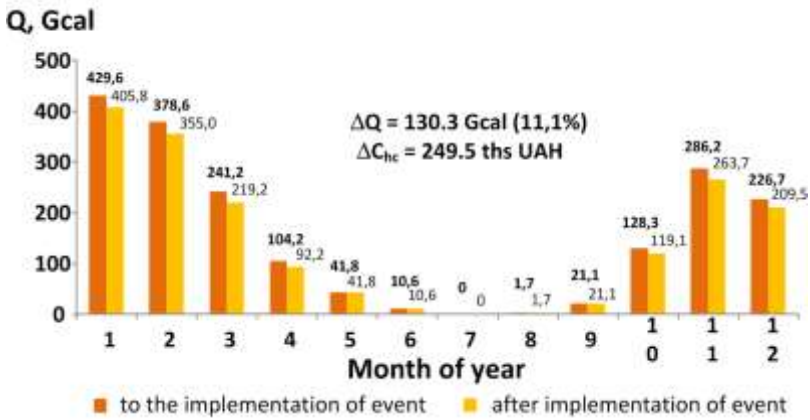


Fig. 13. The results of evaluating the efficiency of use at the full-scale object № 2 of the HERZ Smart Comfort system

Moreover, the relevant indicators of environmental and economic effects are: reduction of natural gas consumption – 16,5 thousand m^3, reduction of CO_2 and NO_x emissions into the atmosphere – 32,0 tons and 0.035 tons, respectively; reduction in heating charges – 249,5 thousand UAH.

Evaluation of the effectiveness of using an alternative source of heat supply – heliosystems. To determine the main energy characteristic

of the heliosystem – its average monthly thermal productivity Q_m (kW·h), the following formula is used[16]:

$$Q_m = E_S \cdot s \cdot \eta \cdot N, \quad (18)$$

where E_S – the specific average monthly thermal output of solar collectors in the Kharkiv climate zone, kW·h / (m^2·day) (see table 4); s – the surface area of one solar collector, m^2 (for collectors of the recommended type is 2,55 m^2); η – solar collector efficiency (0,794 for recommended type collectors[17]); N – the number of solar collectors in the solar system.

Table 5

Calculation results of thermal energy savings in all rooms of the full-scale object № 2 subject to optimization of the temperature regime

Month	**Need for thermal energy before TC, Gcal**	**Need for thermal energy after TC, Gcal**	**thermal energy saving as a result of TC, Gcal**	**Share of energy saved, %**
January	258	234,2	23,8	9,2
February	255	231,4	23,6	9,3
March	185	163,0	22	11,9
April (for the period from 01.04.19 to 14.04.19)	66	54,0	12	18,2
October (for the period from 15.10.19 to 31.10.19)	59	49,8	9,2	15,6
November	188	165,5	22,5	12,0
December	160	142,8	17,2	10,7
Heating season	1171	1040,7	130,3	11,1

[16] Вовчак В., Тесленко О., Самченко О., Сушкова Д. Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України. Керівництво з відбору технологій. Під ред. С. Єрмілова. «Поліграф плюс», 2016. 134 с.

[17] Характеристики сонячного колектору BUDERUS SKT 1.0s. URL : https://220volt.com.ua/solnechnij-kollektor-buderus-skt-1-0s-8718532821.

The results of calculations of the average monthly and annual heat capacity of the heliosystemy, which can be located in the recommended area (Fig. 14), indicate that it is capable of producing 376,7 Gcal of thermal energy per year, or 20,2% of the existing volume of heat of the building of the communal enterprises CI KhPCYC building.

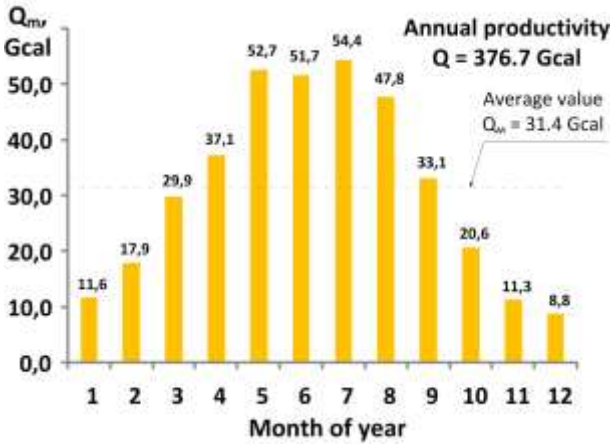


Fig. 14. Diagram of the average monthly thermal output of a heliosystem from 180 SKT 1.0 collectors

If necessary heat output heliosystems can be increased by 2.3 times – up to 880 Gcal/year, if you use the roof of the building to accommodate an additional quantity of 240 solar collectors – 4 rows of 60 pieces (Fig. 15).

A multicriteria assessment of the efficiency of use of the heliosystem shows that this measure allows you to additionally obtain such an annual effect: *energy* – an additional amount of thermal energy – 376,7 Gcal or 20,2%, of which it can be used: the building of the communal enterprises CI KhPCYC – 212,3 Gcal or 11,4%, in other buildings (from May to September) – 164,4 Gcal or 8.8%; In this case, the demand of communal enterprises CI KhPCYC in thermal energy is provided: in the period from May to September – by 100%, in the heating period – by 2,8 ... 35,6%; *ecological* – reduction of natural gas consumption – 47,7 thousand m^3, reduction of CO_2 and NO_x emissions – 92,6 tons and 0,101 tons, respectively; *economic*: reduction of payment for thermal energy – 721.3 thousand UAH; The payback period of the event is 5 years.

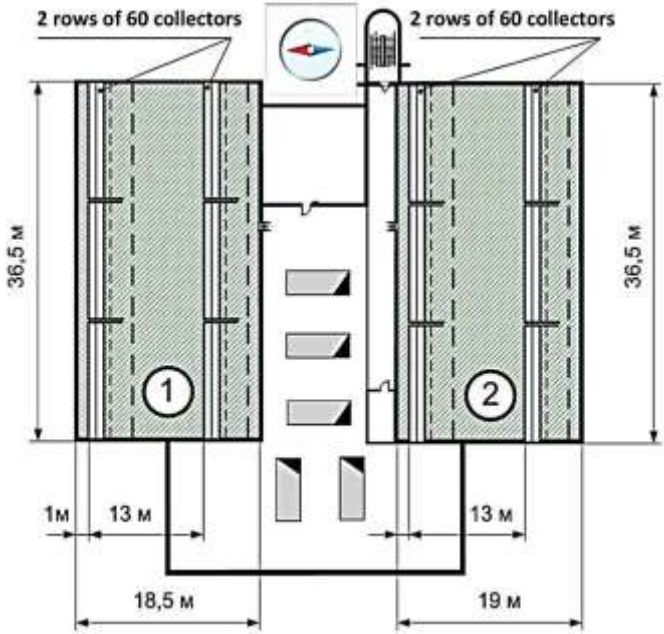


Fig. 15. General view of the additional location of the heliosystem

CONCLUSIONS

1. Created a method of multicriteria performance evaluation of the effectiveness of energy-saving measures for the thermal energy of buildings. The following indicators are used as criteria for assessing the effectiveness of the studied measures in this method: 1) energy effect – the absolute and relative value of the saved thermal energy; 2) environmental effect – the amount of fuel saved, reducing emissions of greenhouse gases and pollutants into the atmosphere; 3) economic effect – the cost of saved thermal energy and fuel.

2. The practical realization of the created method on the basis of 2 full-scale objects: № 1 – a 3-story fragment of the administrative building of O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv with a total heated area of 225 m^2 and № 2 – the building of the communal institution «Kharkov Palace of Children and Youth Creativity» with a total heated area of more than 13700 m^2.

3. For full-scale object № 1, the effectiveness of using «smart home» technology to control the thermal conditions of the building's premises using the HERZ Smart Comfort automated system has been evaluated. The following performance indicators for the use of this measure for the heating period are thermal energy savings – 3734 kWh or 17%, reduction of natural gas consumption for heating – 406,4 m3, reduction of CO_2 and NO_x emissions – 789.1 kg and 0,86 kg, respectively reduction of payment for consumption of thermal energy – 4041 UAH and fuel – 4441 UAH.

4. For full-scale object № 2 was evaluated the effectiveness of 2 energy-saving measures: controlling the thermal conditions of the building's premises with the HERZ Smart Comfort system and using an alternative heat source – heliosystem, which consists of 180 solar collectors. It was established that the 1-st event has such an annual effect: *energy* – 130,3 Gcal or 11.1%; *ecological*: reduction of natural gas consumption – 16,5 thousand m^3, reduction of CO_2 and NO_x emissions into the atmosphere – 32.0 tons and 0.035 tons, respectively; *economic*: reduction of payment for searing – 249,5 thousand UAH; 2-nd event has such an annual effect: *energy* – an additional amount of thermal energy – 376.7 Gcal or 20,2%; *ecological* – reduction of natural gas consumption – 47,7 thousand m^3, reduction into the atmosphere of CO_2 and NO_x emissions – 92,6 tons and 0,101 tons, respectively; *economic*: reduction of payment for thermal energy – 721.3 thousand UAH; the payback period of the event is 5 years.

5. The research results showed such properties of the proposed method for evaluating the effectiveness of energy-saving measures, such as: high information content of the results, providing the possibility of multicriteria optimization of the parameters of heat supply systems and heat consumption of the research object, ability to improve by increasing the number of studied performance indicators.

SUMMARY

The work is devoted to solving an urgent scientific problem – increasing the informativeness of methods for assessing the effectiveness of energy saving measures in the areas of heat supply and heat consumption. The purpose of the research was to create and implement a method for multicriteria evaluation of the effectiveness of energy-saving measures for the thermal energy of buildings. The following indicators are used as criteria for assessing the effectiveness of the studied measures in this method: 1) energy effect – the absolute and relative value of the saved thermal energy; 2) environmental effect – the amount of fuel saved, reducing emissions of greenhouse gases and pollutants into the atmosphere; 3) economic effect – the cost of saved thermal energy and fuel. The practical implementation of the created method was carried out on the basis of 2 full-scale objects: № 1 – a 3-story fragment of the administrative building of Kharkov National University of Municipal Economy them. A.N. Beketova with a total heated area of 225 m^2 and № 2 – the building of the communal institution “Kharkov Palace of Children and Youth Creativity” with a total heated area of more than 13700 m^2. For full-scale object № 1, the effectiveness of using «smart home» technology to control the thermal conditions of the building’s premises using the HERZ Smart Comfort automated system has been evaluated. For full-scale object № 2 was evaluated the effectiveness of 2 energy-saving measures: controlling the thermal conditions of the building’s premises with the HERZ Smart Comfort system and using an alternative heat source – heliosystem, which consists of 180 solar collectors. The research results showed such properties of the proposed method for evaluating the effectiveness of energy-saving measures, such as: high information content of the results, providing the possibility of multicriteria optimization of the parameters of heat supply systems and heat consumption of the research object, ability to improve by increasing the number of studied performance indicators.

REFERENCES

1. The Covenant of Mayors for Climate and Energy Reporting Guidelines / Covenant of Mayors & Mayors for climate and energy. *Adapt Offices and the Joint Research Centre of the European Commission*, 2016. 78 p.

2. Alibekova A., Shaimerdenova G., Agilbaeva M. Ecolodica problems of thermal power plants. *Journal of Industrial Technology and Engineering*, 2013. Вип. 4(09). P. 40–44.

3. Варламов Г.Б., Дідик І.С. Основні особливості реалізації принципу екологічної рівноваги на екологічному об’єкті. *Молодий вчений*, 2016. Вип. 1/ Ч. 3. С. 104–107.

4. Маляренко В.А., Щербак І.Є. Аналіз споживання паливно-енергетичних ресурсів України та їх раціонального використання. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*, 2013. Вип. 14(988). С. 118–126.

5. Купалова І. Визначення обсягів викидів стаціонарними джерелами. *Вісник. Офіційно про податки*, 2016. Вип. 32(889). С. 32–37.

6. Тарифи на теплову енергію для бюджетних установ, інших споживачів (крім населення) і релігійних організацій. КП «Харківські теплові мережі». URL : http://www.hts.kharkov.ua/KPHTS_v2_public_info_tarify.php.

7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учебник для вузов. *Энергия*, 1975. 488 с.

8. HERZ Smart Comfort: дистанционное управление комфортом дома. URL : https://voltar.com.ua/news/herz-smart-comfort-distantsionnoe-upravlenie-komfortom-doma.html.

9. Polivyanchuk A., Kovalenko Y. Improving the efficiency of thermal energy use when heating buildings through the introduction of technologies «smart home». *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2018. Вип. 19. С. 119–126. DOI: 10.26565/1992-4259-2018-19-12.

10. Плоскі сонячні колектори Logasol SKT 1.0. Будерус Україна. URL : https://www.buderus.ua/products/solar/skt10.html.

11. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О., Сушкова Д. Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України. Керівництво з відбору технологій / Під ред. С. Єрмілова. *«Поліграф плюс»*, 2016. 134 с.

12. Дорогунцов С.І., Коценко К.Ф., М.А. Хвесик. Екологія : підручник. *КНЕУ*, 2005. 104 с.

13. Прутська О.О., Федик О.Ю. Сучасний стан та проблеми розвитку альтернативної енергетики в Україні. *Збірник наукових праць ВНАУ*, 2012. Вип. 1(56). Т. 2. С. 158–164.

14. Штен І. Аналіз конструкцій геліосистем гарячого водопостачання, які використовуються в Україні. *Збірник тез Міжнародної студентської науково-технічної конференції Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання*, 2018. Т. 1. С. 131–132.

15. Характеристики сонячного колектору BUDERUS SKT 1.0s. URL : https://220volt.com.ua/solnechnij-kollektor-buderus-skt-1-0s-8718532821.

Information about authors:
Polyvianchuk A. P.,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
17, Marshall Bazhanov, str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Belousov I. V.,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Kherson State Maritime Academy
Ushakova avenue, 20, Kherson, 73000, Ukraine

Semenenko R. A.,
Postgraduate Student at the Department of Engineering Ecology of Cities
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
17, Marshall Bazhanov, str., Kharkiv, 61002, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.18

MAIN DIRECTIONS OF TRAFFIC MANAGEMENT IN UKRAINE'S INTERNATIONAL TRANSPORT SYSTEMS

Prokudin G. S., Chupaylenko O. A.

INTRODUCTION

Topicality of the research lies in the decision of problems of logistics management related to the transportation of goods, inventory management resources of trucking companies and development of new methods of organization of transport processes based on the principles of logistics that necessitate a constant search of reserves of increase of economic efficiency and require further development and improvement of methodologies, mathematical models, algorithms and appropriate computer software to implement them.

The solution to these problems is subject of many scientific papers in the field of transport systems, logistics, marketing, operations research, inventory management resources. A significant contribution to the development of the theory of transport processes and systems and in addressing the effective management of international cargo transportation was made by scientists: A.I. Vorkuta, G.N. Poor, P.G. Levkowitz, T.A. Vorkuta, G.S. Prokudin, Polishchuk V.P., John. Bowersox, To.L. Geronimus, L. Would. Mrtn, S.A. Panov, George. Shapiro, G.A. Habutdinov, To.M. Chetverukhin and others[1].

Paying tribute to the scientific achievements in the field of increase of efficiency of functioning of transport logistics, the application of it in this direction in a market environment require further research.

The effective management of the process of international freight transportations, as a rule, not fully take into account the specific features of their performance and as a consequence no single approach to defining the goals and objectives of the management of the logistic system of international freight transport and the processes of its functioning.

---

[1] Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O. Improvement of the methods for determining optimal characteristics of transportation networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. N. 6/3 (84). 2016. P. 54–61. DOI:10.15587/1729-4061.2016.85211.

The paper presents the main requirements to the process of organization of international cargo transportation. Scientific and practical relevance of this issue led to the choice of the theme, goals, objectives, object and subject of research.

The main task of the development of the transport complex of Ukraine for the medium term period up to 2020 is to identify ways of solving the problems of further development of the transport sector, growth in demand for transport services, enhance the integration of transport-road complex of Ukraine into European and world transport systems.

The main state decisions that deserve to be included in the recent history of road transport in Ukraine are:

– the divestment of auto companies that have become commercial and have started operating in accordance with national rules and rules of business activity in a competitive environment;

– Establishment of the Association of International Road Carriers of Ukraine (ASMAP) as a national Association - a member of the International Union of Road Transport (IRU). The state delegated to this non-governmental organization the function of the organization of international freight traffic on the system of international road transport (TIR) in accordance with the TIR Convention of 1975. This association replaced the previously existing state organization Sovtransavto, but in a new capacity;

– creation of VAAP (All-Ukrainian Association of Carriers of Ukraine);

– public non-profit organization created as a result of voluntary association of persons working in the field of road transport to protect their legal rights and interests, coordination of joint actions aimed at the development of the transport industry of Ukraine in the direction of passenger transportation.

The study was performed in accordance with the "Concept of development of the transport and road complex of Ukraine for the medium term and up to 2020".

The purpose of the study is to increase the efficiency of cargo transportation in international traffic by developing and implementing models, methods and software for the rational organization of international cargo transportation.

1. Analysis and forecast of the market of international cargo transportation

Scientific and technical progress in the transport sector is one of the main factors of development of society, improving the welfare of its citizens. The strategic task of scientific-technical policy in the field of transport system (TS) is the state's global reach on technical parameters and quality of services provided by the transport. In this regard, a priority and a priority for the transport sector is the extension of scientific researches on problems of creation of progressive technologies, organization of international cargo transportation and technical equipment of new generations, formation and effective functioning of the customs Union, the development of fundamentally new control systems using advanced information technologies.

The objective regularities of functioning of the transport system are the following:

– the normal functioning of the transport system due to the debugged work of all types of transport included in the system;

– mandatory proportional to the development of transportation and processing opportunities in the interactive areas of the transportation network of various modes of transport;

– determine the quality of transport service of economy of national economy and population of state quality standards of transportation and the appropriate fees;

– optimal organization of traffic on the transport network with the introduction of the method of analytic mappings, covering the whole logistic route of goods;

– higher productivity of transport on outcome based on the theory of integrated exploitation modes of transport, is the system form their use.

Despite a good geopolitical location, Ukraine has a ramified system of transport and communication reports and is significantly behind in creating its own transport corridors, which negatively affects the formation of the competitiveness of both the state and domestic enterprises. The direction of expansion of international transport corridors is a priority of the state transport policy of the country in the way of its integration into the international economic system.

Today Ukraine different from other countries that a significant number of its cities are located on traditional transportation and communication routes of the Eurasian continent. The question of the creation of Ukraine's international transport corridors will accelerate not

only the strategic goals of integration into the European community, but also addressing such tasks as attraction of additional investments into development of transport infrastructure, acceleration of the rate of output from the decline of domestic producers, improving foreign exchange earnings through transit, the growth of exported products.

Transport of Ukraine is a powerful communication system, which includes all its types (water, road, rail, pipeline, air). Transport's major production assets make up about 20% of the country's production assets.

All types of transport are developed in Ukraine. The road network, combined with transport centers and nodes, together with rolling stock, ports, warehouses and other farms, forms the transport complex of the state. There are 372 km of railway tracks, 78 km of inland waterways and 2,800 km of paved roads per 100 thousand km2 of territory. Most of the freight and passengers are rail and road transport[2].

Road transport is a short distance away from competition. Its great advantage is that it is almost independent of natural conditions and can deliver cargo on a door-to-door technology. On the density of highways (280 km per 1000 km2) with a hard surface, Ukraine ranks first among the CIS countries.

The main stage in the implementation of high-quality and efficient international freight transportation is the stage of choosing a carrier, which depends on the end result of the transport delivery process. It should be noted that under difficult crisis conditions, many carriers were forced to leave the market, but the largest and the strongest, accounting for almost 60% of all freight and passenger transportation, remain afloat (see Table 1)[3].

Road transport holds first place in passenger transportation and second in cargo turnover. The length of the roads is almost 170 thousand km (155 thousand km of roads has a hard surface), but their quality by European standards is unsatisfactory. Imperfect fleet, lack of necessary service on the roads, high prices for gasoline make motor transport one of the most expensive modes of transport.

---

[2] *Prokudin, G. Optimization of traffic on a road networkin. Economy and management. № 3(4).* 2006. P. 54–59.

[3] Transit freight for the period 2008-2019 years State service statystyky Ukrayiny. URL : http://www.ukrstat.gov.ua.

Table 1

Leading trucking companies in Ukraine

Company name	Type of international activity licensed	Number of vehicles, pcs.
“Transalt” Ltd	cargo and passenger	75
“Agrotep” Ltd	cargo and passenger	63
“BM-Trans” Ltd	cargo	55
“West-Group-Trans” Ltd	cargo	49
“Orlan-Trans-Group” Ltd	cargo and passenger	61
“Car Company Ukrtrans” Ltd	cargo and passenger	72
“Rapid” Ltd	cargo and passenger	87
“Eurotrans” Ltd	cargo and passenger	78
“Epicenter” Ltd	cargo and passenger	117

It is appropriate to emphasize that Ukraine has all the prerequisites for creating a strong transit system at the international level and, as a consequence, increasing the volume of cargo transit. Yes, our country has a number of advantages over other European countries, since Ukraine has the shortest land, sea and air routes connecting Europe and the countries of the Asia-Pacific region. Interstate transit through Ukrainian territory is a large but not yet realized national resource.

According to the State Statistics Committee of Ukraine, we will compile a turnover table for all modes of transport for 2012–2018 (see Table 2).

Table 2

Volumes of cargo transportation by different modes of transport

Years	Cargo transported by all means of transport (million tons)				
	Railway	Automobile	Cars	Pipeline	Air
2012	299,5	107,5	5,2	101,3	0,1
2013	303,1	114,1	6,4	104,6	0,12
2014	433,3	160,2	11,3	151,3	0,12
2015	395,6	158,3	10,9	154,2	0,1
2016	499,1	187,4	20,1	187,1	0,14
2017	505,4	200,3	21,3	202,6	0,13
2018	525,7	225,6	24,4	219,7	0,14

The location of Ukraine in the center of Europe, at the crossroads of the main transport destinations of the continent, necessitated the passage through its territory of international transport corridors, the direction of which coincides with the ancient East-West and South-North transit routes.

Ukraine's location is promising from the point of view of international transport and economic links, firstly, due to its favorable geographical position, and secondly, Ukraine is located at the crossroads of railway, road, air, pipeline routes connecting the eastern regions of Russia, Kazakhstan, the countries of Central Asia and the Caucasus with the countries of Central and Southern Europe, as well as the northern and central regions of Russia, Finland, Poland, the Baltic countries with the countries of the Black Sea basin. The main European countries exporters-importers of Ukraine in recent years – Italy, Germany and Poland[4].

Not only east-west but also north-south links are expanding, and a network of so-called transit corridors is beginning to emerge. The most important highways are: Kyiv – Zhytomyr – Exactly Lviv – Uzhgorod; Kiev – Poltava – Kharkiv; Kiev – Uman – Odessa; Kharkiv – Zaporozhye – Simferopol.

The motorway road between remote from each other settlements or districts, which is designed for high-speed traffic large number of vehicles in two opposite directions. Highways – the major (main) on the transport routes and lines with high bandwidth or involving major traffic flows (passenger or freight flows). Vary the load (of stream size), functions (monofunctional and polyfunctional), hierarchy, modes of transport.

Extended multi-species transport routes passing through the territory of several economic regions or countries, referred to as transport corridors. To polimerstroy include, for example, rail-road Kiev – Ternopil – Lviv, road-rail-river Kiev – Dnepropetrovsk – Zaporozhye, etc.

The length of motorways Ukraine is behind many European countries. Low quality of roads and service stations creates problems in the integration of Ukrainian transport network into the European.

Major transport hubs are Kyiv, Kharkiv, Dnepropetrovsk, Donetsk, Kiev, Uman, Lviv. The role of road transport in long-distance traffic and international traffic. Main road "exits" from Ukraine road from Kovel, Lviv, Uzhgorod, Chernivtsi, Odessa, Izmail, Mariupol, Kharkiv, Sumy, Glukhov, Chernigov.

The development of transit opportunities of Ukraine is one of the main sources for replenishing the national budget and strengthening economic ties with neighboring countries.In particular, the building of

---

[4] Prokudin G., Oliskevich M., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4/3(100). P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061. 2019. 174255.

the TRANS-European motorway Kyiv – Madrid. Important for freight transport are “international transport corridors (ITC). On the territory of Ukraine pass four international transport corridors, namely: the pan-European No. 3; pan-European No. 5; pan-European № 7 the Danube (water); pan-European № 9 (Fig. 1–4)[5].

.

Figure 1. Pan-European № 3 (Berlin (Dresden) – Wroclaw – Lviv – Kiev)

Figure 2. Pan-European № 5 (Trieste – Ljubljana – Budapest – Bratislava – Uzhhorod – Lviv)

[5] Kunda N.T. Organization of international road transport. Kyiv : Word, 2010. 464 p.

Figure 3. Pan-European № 7 Danube (water)

Figure 4. Pan-European (Helsinki – Saint Petersburg – Vitebsk – Kiev (Moscow) – Odessa – (Chisinau) – Plovdiv – Bucharest – Alexandroupolis

An important role in the development of freight transport is played by the MTC, because represent a complex of land and water transport routes with appropriate infrastructure in a certain direction, including auxiliary facilities, access roads, border crossings, service points, freight and passenger terminals, equipment for traffic management, organizational-technical measures, legislative and normative acts, which provide for the

carriage of goods and passengers at a level consistent with the requirements of the European community.

Every year the countries of Europe, who are the main partners of Ukraine in the foreign economic sphere toughen requirements to the technical condition of vehicles, due to environmental problems, and the number of registered environmental vehicles that perform road freight transport is constantly growing.

Given this fact, the Government has banned since 1 January 2014 the importation of vehicles that do not meet the Euro-3 standard. At the same time began to operate in the country, the ecological standard Euro-4. In 2016 Ukraine will enter into force on standard Euro-5, and from 2018 in our country can be imported only vehicles that meet the highest environmental standards Euro-6.

Today science has advanced a long way in the development of forecasting technologies. Specialists are well known methods of neural network forecasting, fuzzy logic, and the like. Developed appropriate software packages, but in practice they are, unfortunately, not always available to the average user, and at the same time, many of these problems can be quite successfully solved using methods of operations research, particularly simulation modeling, game theory, regression and trend analysis, implementing these algorithms in a widely known and widespread software package MS Excel.

We are going to implement the algorithm for constructing a predictive model described above. The solution to this problem implemented in MS Excel environment that allows to significantly reduce the number of calculations and time of model building.

Regression analysis is used when the relationship between variables can be expressed quantitatively in the form of some combination of these variables. The resulting combination is used to predict values that can take the target (dependent) variable which is calculated on a given set of values of the input (independent) variables. In the simplest case, for this purpose, standard statistical methods such as linear regression.

The advantages of this regression analysis tool are:

– the relative ease of plotting trend lines without creating a data table for them;

– a fairly broad list of types of proposed trend lines, with the most commonly used regression types;

– ability to predict the behavior of the process under study to an arbitrary (within common sense) number of steps forward and backward;

– possibility to obtain the trend line equation in analytical form;

– the possibility, if necessary, of obtaining an estimate of the reliability of the approximation performed.

We determine the trend that best approximates the actual data. For this purpose it is recommended to use an exponential, linear, logarithmic, polynomial, and power trend, which reduces the error of the forecasting model.

Having carried out a regression analysis of the volumes of international road freight transport and using the obtained equations of the trend lines, we determine the tabulated data on the volumes of international road haulage for each trend line for 2008–2020, we see its gradual growth (Fig. 5).

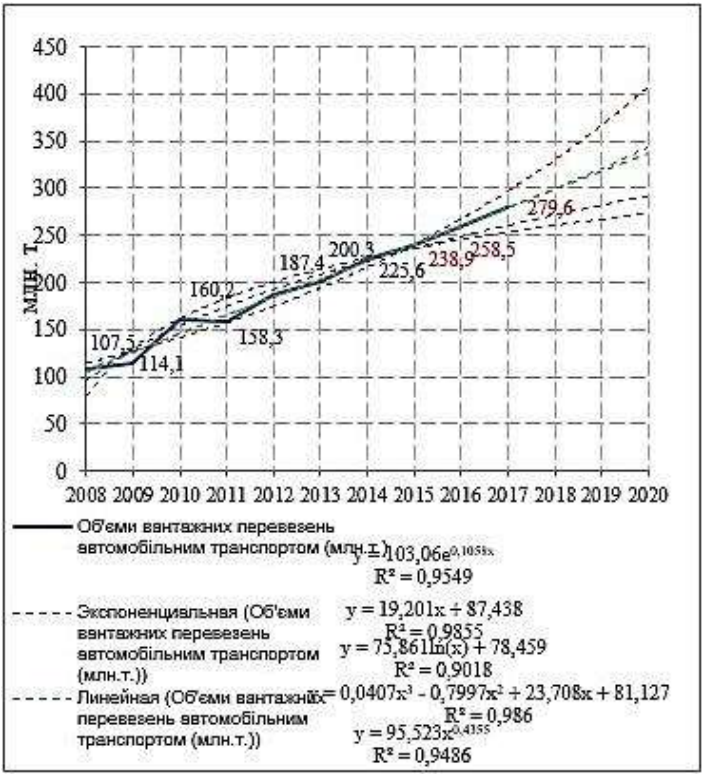


Figure 5. Regression analysis of international road freight transport volumes for 2008–2020

2. The main problems and technologies of international cargo transportation

As evidenced by the analysis of the available data, in the absence of an adequate reaction from the Ukrainian state expected in the next 3-4 years, changes in the functioning of the market of transport services and access thereto, to a large extent can be reduced, the share of domestic motor carriers for domestic and international transport markets, which in turn will negatively affect the situation with the loss of transit potential of the country and could lead to a significant reduction in the national gross domestic product of the state.

On the introduction of more stringent norms and standards of functioning of the market of transport services and access are now working for international organizations, which operate in the transport sector (European economic Commission of the UN, the European Commission, the Organization for security and cooperation in Europe and international transport forum). The effect of the new norms and standards will apply to Central European countries and the countries of Eastern and South-Eastern Europe, Caucasus and Central Asia, will cover all modes of inland transport (road, rail, water transport and multimodal transport).

In the context of ensuring the realization of transit potential for the last 8 years has significantly increased the role of international road carriers (private companies, United by the Association of international road carriers of Ukraine). If during the period from 2005 to 2013, the transit cargo traffic through Ukraine pipeline and railway transport decreased significantly (respectively by 39,8% and 44%), then transit road transport of goods on the territory of Ukraine increased by 7,6 times. On the other hand, the tendency to diversion of transit cargo transportations through the territory of Ukraine from rail to road transport: the share of rail transportation in this period decreased by 8,66%, while the share of transit traffic by road transport the territory of Ukraine increased by 9,3%[6]. Ukraine has not been sufficiently prepared for the introduction of new, more stringent norms and standards:

[6] Prokudin G.S. Prospects of cross-border cooperation of Ukraine in transport sphere. International Scientific Conference Innovative Economy: Processes, Strategies, Technologies / Conference Proceedings. Part II. Kielce. Poland: The Baltic Publishing. P. 53–55.

– the system of organization of international freight transportation, road transport is imperfect, and there is no systematic approach to ensuring the functioning of road transport;

– the rolling stock of the road transport fleet is technically obsolete and its updating is slow (only 11% of vehicles used in international transport meet the environmental standards of transport admission planned by 2016 under the European Conference of Ministers of Transport (no lower than “Euro-4”);

– the level of traffic safety is low, the road accident rates are much worse than in the EU countries (our country ranks fifth in Europe in terms of road accident);

The operational characteristics of the national transport infrastructure do not allow the implementation of the “European Agreement on the Operation of Crews of Vehicles Performing International Road Transport (ETP)” (practically no properly equipped parking and resting places for drivers).

Tougher rules and standards should be in place by 2020 in terms of the functioning of domestic and international market of transport services and access to it. To a large extent they will determine the further development and the formation of a transport space as the Central European countries and countries of Eastern and South-Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. According to experts, the new rules and standards may significantly change the configuration of freight traffic. And in the absence of adequate state response on the part of Ukraine to external challenges – significantly displace Ukrainian (in particular automotive) carriers from the international market of transport services.

More stringent norms and standards concerning the functioning of the domestic and international market of transport services and access to it will cover all modes of inland transport (road, pipeline, rail and inland water transport and multimodal transport) and will be focused on the facilitation of border-crossing procedures, traffic safety and transport of dangerous goods, improving environmental and energy efficiency transport and transport infrastructure.

Special attention from the UN / ECE will be given to more effective enforcement of the existing legal framework of the region of influence.

It should be emphasized that in 2016–2020, the UNECE plans to strengthen its role in the formation of a pan-European and transcontinental infrastructure, as well as to expand the region of its influence: it is expected in particular that in the four major agreements in

the field of transport infrastructure will be joined by new countries, primarily from Eastern and South-Eastern Europe, Caucasus and Central Asia.

Thus, given the above, we can say that the lack of state support and reduction of the presence of the Ukrainian transport organizations can lead to a substantial decrease in gross domestic product and the role of Ukraine as an influential player in the domestic and international market of transport services.

As for the technology of international cargo transportation, it should be noted that market relations impose on the transport strict requirements to accelerate time of delivery of goods, while minimizing transportation costs. Between the producer and consumer to a complex system of transport relations, which should ensure a high level of transport service quality.

International cargo transportation depending on the mode of transport can be the following: in the case of water connection, the sea and river modes of transport are used, carrying out the transportation of cargoes and passengers by waterways, both natural (rivers, lakes, seas, oceans, straits) and artificial (canals, reservoirs and other). Water transport requires vessels, ports and waterways.

Allocate main river paths, incl. international, which services foreign trade in some countries, interregional services that operate between large areas within the country, and local services that serve intra-area communications.

All inland navigation vessels are distinguished as follows: by area of navigation; by type of transportation and work performed; housing material; the type of engines and motors; the principle of motion; flight duration.

In road transport, international freight is carried out by specialized vehicles of different carrying capacity. The main normative documents governing the carriage of goods by road are the Charter of Road Transport and the Rules of Carriage of Goods by Road in Ukraine.

Road transport is carried out, which are classified by:

– belonging to transport (public transport, departmental transport, own transport of business organizations and units);

– distance of transportation (suburban, long distance, international);

– ways of organizing and performing transportation (centralized, decentralized, direct, mixed, combined, container, batch);

– duration of transportation (permanent, seasonal, temporary);
– types of cargo (by type of product or type of container);
– sizes of cargo desks (mass, party, small-party).

The main stages of the technological process of transportation of goods by road:

– acceptance of cargo for transportation;
– marking and sealing of cargo;
– car loading;
– registration of documentation;
– carrying out the process of transportation and delivery of cargo to the recipient;
– unloading the car;
– receiving the goods by the consignee;
– payments for freight.

In the case of a railway connection, by type of departure, that is, taking into account the size of the consignment sent by rail, the following shall be distinguished.

Smalls – they have a place when a consignment of goods presented for transportation on one transport document is not required to provide separate cars (in the dispatch mass included the mass of the cargo, containers or packing, and adequate mass transportation facilities). Transportation of small consignments is carried out usually in a mixed universal car. In this car parcels owned by different shippers, combined into a single wagon consignment transportation design for separate consignment notes.

Carload shipment carload shipment is considered a shipment, charged for one consignment of goods for which there is also a separate car.

Container shipment, container shipment is considered freight that are charged with one transport document for carriage in container, or a container empty condition.

If any of the following methods of freight transport, the technology of process of their delivery by road, rail, water, air transport or their various combinations, including handling, customs and other operations aimed at reducing the time of cargo. To date, the process system of multimodal transport represents the delivery of the first vessel and subsequent unloading to the site of the port and load onto a truck or the platform to continue moving goods to customs (where the inspection and registration), and then transfer to the consignee.

Implementation of measures to increase the throughput capacity of road checkpoints at the customs border of Ukraine will create the conditions for a quick and comfortable crossing the border of Ukraine in the framework of the volume of motor traffic across the border, which are formed in the present and in the future in the coming years. Note that throughput in some cases can be increased by changing some parameters, such as reducing the time of wait in international checkpoints, increasing the number of lanes on the roads, increasing speed, through improving the quality of the roadway.

The length of railway network of the international transport system of Ukraine amounts 3162 km, of which 92,3% – double track line, 77,3% – electrified, 90% – equipment-locking. Over the last 5 years in the areas of transport corridors electrified 500 km of tracks, reconstructed 85 stations, increased train speeds. The construction of new railway network with the levels of speed up to 300 km per hour and a fundamentally new rolling stock and gauge of 1,435 (European standard) mm 1520 mm. instead of the high-speed transport will be used for passenger and light truck traffic. This option is related to the period after 2020[7].

Open railway ferry crossing Ilichevsk – Poti – Batumi, which is one of the main links of the corridor TRACECA (Europe – the Caucasus – Asia). Put into operation the second phase of the grain loading complex in Ilyichevsk sea port engaged in the transshipment of grain in countries of South America, Southeast Asia, Saudi Arabia and the like.

Renovated a significant number of road sections Chop – Lviv – Kiev and Novi yarylovychi – Chernigov – Kiev – Odessa. Reconstruction of roads in the area, the MTC has allowed to increase the permissible weight of vehicles from 36 to 40 tons. Reconstruction of existing roads involves bringing their parameters to the international requirements and standards. Additional to the existing construction of new high-speed roads mainly in certain areas in a new row.

To ensure the efficient operation of transport corridors is important to create the border and customs checkpoints, as well as transport and storage facilities for cargo processing, which are divided into:

---

[7] Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of Ukraine's international transit potential. European Journal of Intelligent Transportation Systems. N.1(2). 2019. P.26-31. DOI: 10.31435 /rsglobal_ejits/ 31072019/ 6580.

– border land, which are located in Kovel, Rava-Ruska, Mostyska the, chop, Kharkiv, Sumy, Chernihiv;

– land (Kiev, Zhytomyr, Vinnytsia, Poltava, Sumy, Dnipropetrovsk, Kirovohrad, Cherkasy, Simferopol, Melitopol, Odessa, Khmelnytsky, Ternopil, Rivne, Lviv, Ivano-Frankivsk);

– water (in Reni, Izmail, Ust-Danube, Belgorod-Dnestrovsky, Illichevsk, Odessa, Yuzhny, Nikolaev, October, Kherson, Skadovsk, Yalta, Berdyansk, Mariupol, Zaporozhye, Dnepropetrovsk, Kiev).

International transport network of Ukraine and the current systems of transportation in the conditions of transformation economy require fundamental changes in operational and technological activities, as well as replacement of vehicles and equipment the main requirements in these matters are:

1) maximum reduction of transportation costs;

2) revaluation criteria in approaches to the definition of transport efficiency, the transition from the workload of transport in economic and financial;

3) providing adequate velocity of the transportation and delivery of passengers and cargo;

4) ensuring the safety of cargo during transportation;

5) improving the quality of services in transport.

Special geographical position of Ukraine, which allows it to rightfully take the place of a transit country, and as a consequence of the large number of existing transit corridors, highways of international and European importance, major transport hubs, which concentrate in themselves the railway stations, airports, river and sea ports, places high demands on the control system of transport of passengers and cargo.

As evidenced by the analysis of the available data, in the absence of an adequate reaction from the Ukrainian state expected in the next 3-4 years, changes in the functioning of the international market of transport services and access thereto, to a large extent can be reduced, the share of domestic road carriers on the international transport markets. The latter, in turn, have a negative impact on the situation with the loss of transit potential of the country and could lead to a significant reduction in the national gross domestic product of the state.

On the introduction of more stringent norms and standards of the international market of transport services and access are now working for international organizations in the field of transport economic

Commission for Europe, UN, European Commission, Organization for security and cooperation in Europe and international transport forum.The new norms and standards will apply to Central and Eastern and South-Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia, covering all modes of inland transport (road, rail, inland waterway and mixed transport). The introduction of changes is aimed at the development of cross-border transportation in the pan-European and transcontinental market of cargo and passenger transportation by simplifying border procedures, ensuring the safety and traffic of dangerous goods, improving the environmental and energy efficiency of transport, the proper functioning of transport infrastructure and so on.

CONCLUSIONS

Creating a unified international transport and logistics system, geographical position of Ukraine's transport space, as well as the presence of many transport corridors requires the following:

– separate analysis of the management of the transport nodes;

– ensuring coordination and interaction of all modes of transport;

– introduction of modern achievements of the scientific and technological revolution in the work of transport.

The development of an efficient organization of cargo delivery with the coherence of all links in the transport process has necessitated a large number of theoretical and experimental studies on various issues of transport. On functional grounds they can be classified in the following areas:

– general questions about the theory of transport systems and processes;

– operational properties of vehicles;

– interaction of modes of transport and freight forwarding activities;

– formation of logistics systems.

The study of transport processes has made the following conclusions:

1) one of the main factors affecting the efficiency of the transport system is the quality of routing of freight traffic and the level of interaction of different modes of transport;

2) stochastic characteristics must be taken into account when modeling the individual components of the transport system to obtain adequate results;

3) the assessment of the performance of international freight traffic in market conditions requires improvement of the relevant performance criteria.

SUMMARY

Modern market conditions require Ukraine to form a competitive logistics system with the further entry into the international world macrosystem, which will allow Ukraine to form a competitive transport system and effective infrastructure, strengthen international relations with other trade regions and countries.

The question of improving competitiveness on the world market is one of the most urgent areas of development for Ukraine, and clusterization is one of the ways of effective economic development and its maintenance on the proper level in the system of world economic relations. Taking into account that the transport and logistics industry plays an important role in the public production of our country, the formation of transport and logistics clusters will have great social and economic significance for both the regional and national economies. Clusters become the poles of economic growth, not only of individual regions in which they are localized, but also of the state as a whole. The task of the state is to create the necessary conditions, an attractive investment environment for the emergence of new ones and the development of existing clusters.

REFERENCES

1. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O. Improvement of the methods for determining optimal characteristics of transportation networks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 6/3(84). 2016. P. 54–61. DOI:10.15587/1729-4061.2016.85211.

2. Prokudin G. Optimization of traffic on a road networkin. Economy and management. № 3(4). 2006. P. 54–59.

3. Transit freight for the period 2008-2019 years State service statystyky Ukrayiny. URL : http://www.ukrstat.gov.ua.

4. Kunda N.T. Organization of international road transport. Kyiv : Word, 2010. 464 p.

5. Prokudin G., Oliskevich M., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of vehicle speed forecasting method for intelligent highway transport system. *Eastern-European Journal of Enterprise*

Technologies. 2019. 4/3(100). P. 6–15. DOI: 10.15587/1729-4061. 2019. 174255.

6. Prokudin G.S. Prospects of cross-border cooperation of Ukraine in transport sphere. International Scientific Conference Innovative Economy: Processes, Strategies, Technologies / Conference Proceedings. Part II. Kielce. Poland : The Baltic Publishing. P. 53–55.

7. Prokudin G., Chupaylenko O., Dudnik O. Development of Ukraine's international transit potential. *European Journal of Intelligent Transportation Systems*. № 1(2). 2019. P.26-31. DOI: 10.31435 /rsglobal_ejits/ 31072019/ 6580.

Information about authors:
Prokudin G. S.,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Chair of International Transportation and Customs Control
National Transport University
1, Suvorova str., Kyiv, 01010, Ukraine

Chupaylenko O. A.,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Chair of International Transportation
and Customs Control
National Transport University
1, Suvorova str., 1, Kyiv, Ukraine, 01010

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.19

DEVELOPMENT OF VANADIUM OXIDE ZIRCONIUM SILICATE CATALYST FOR REACTION OF PROPANE DEHYDROGENATION

Redkina A. V., Konovalova N. D.

INTRODUCTION

Light olefins, primarily ethylene and propylene, are large-tonnage base intermediates in the petrochemical industry[1]. They are used in the production of polymers, plastics, synthetic fibers, drugs, rubbers, dyes, detergents, lubricants, high-octane components of motor fuels, solvents and many other products[2]. Most of them are produced in ethylene plants by steam thermal and liquid phase catalytic cracking of products of distillation of crude oil and associated petroleum gases. However, the global demand for propylene significantly exceeds its production volumes by these methods, therefore, in recent years; an alternative "non-oil" technology is developed at a faster pace for the targeted production of propylene by direct catalytic dehydrogenation of propane (DHP)[3,4,5,6]. This is also facilitated by the downward trend in world oil reserves, a drop in the content of propylene in products its making and a significant increase in the production of cheap natural shale gas, which in

---

[1] Брагинский О.Б. Мировая нефтехимическая промышленность. Москва : Наука, 2003, 556 с.

[2] Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты органических и неорганических веществ. Часть II. СПб. НПО «Профессионал», 2007, 1144 с.

[3] Макарян И.А., Рудакова М.И., Савченко В.И. Промышленные процессы целевого каталитического дегидрирования пропана в пропилен. *Междунар. научн. журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2010.Т.86, № 6. С. 67–81

[4] Vora B.V. Development of Dehydrogenation Catalysts and Processes. *Top. Catal*. 2012. V. 55. P. 1297–1308. DOI:10.1007/s11244-012-9917-9

[5] Sattler J.H.B., Ruiz-Martinez J., Santillan-Jimenez E., Weckhuysen B.M. Catalytic Dehydrogenation of Light Alkanes on Metals and Metal Oxides. Chem. Rev. 2014. V. 114**,** №. 20. P. 10613–10653. https://doi.org/10.1021/cr5002436|

[6] Nawaz Z. Light alkane dehydrogenation to light olefin technologies: A comprehensive review.*Rev. Chem. Eng.* 2015. V. 31, № 5. P. 413–436. https://doi.org/10.1515/revce-2015-0012

addition to the main methane also contains ethane and propane[7]. An additional advantage of the technology of catalytic dehydrogenation of light alkanes and, in particular, propane, is also the fact that this universal technique, with relatively less investment, allows to obtain high-purity olefins instead of a mixture of products and to ensure co-production of hydrogen:

$$C_3H_8 \leftrightarrow C_3H_6 + H_2 \ (\Delta H^0_{298} = 124{,}3 \text{ kJ/mol}).$$

On the other hand, the dehydrogenation of light alkanes C2-C4 is one of the most complex chemical processes for implementation on an industrial scale. These reactions are highly exothermic; therefore, in order to obtain alkane conversion of ≥ 50% at a pressure of 1 bar, it is necessary to increase the temperature to 550-750°C[8]. At these temperatures, the rupture reactions in alkane molecules of a less strong C-C bond with the formation of by-products of their cracking and further coke become thermodynami-cally and kinetically more favorable. Catalyst for the dehydrogenation process should predominantly activate the cleavage of C-H bonds in alkanes, minimizing and slowing down the process of molecular destruction, including the formation of more reactive olefins. In addition, these reactions are reversible and occur with an increase in the volume of gases; therefore, the maximum degree of alkane conversion is limited by the establishment of thermodynamic equilibrium, which can be shifted towards the formation of the target olefins by lowering the pressure in the system below atmospheric or by reducing the partial pressure of alkanes by diluting with steam or an inert gas.

Many materials have been studied as catalysts for the dehydrogenation of light alkanes and five main production processes have been patented, which differ in the type of reactor, the operating mode, and the catalyst used. These are the processes: Catofin (ABB Lummus Crest/United Catalysts)[9], Oleflex, firms UOP (US)[10]; STAR

---

[7] McFarland E. Unconventional Chemistry for Unconventional Natural Gas. Science. 2012. V. 338. P. 340–342. DOI: 10.1126/science.1226840

[8] Sattler J.H.B., Ruiz-Martinez J., Santillan-Jimenez E., Weckhuysen B.M. Catalytic Dehydrogenation of Light Alkanes on Metals and Metal Oxides. Chem. Rev. 2014. V. 114, №. 20. P. 10613–10653. https://doi.org/10.1021/cr5002436

[9] Bhatt B.L., Kirner J.F., Rao P. and Schwartz W.A. Catalytic dehydrogenation reactor cycle. Pat. US 4581339, Publ. Apr. 08, 1986

[10] Bricker J.C., Jan D.-Y., Foresman J.M. Dehydrogenation catalyst composition. Pat. US 4914075, Publ. Apr. 03, 1990

(Phillips Petroleum Company)[11], FFB – Fluidized Bed Dehydrogenation (Snamprogetti – Yarsintez)[12] and Linde-PDH BASF[13]**.** However, in all of these technologies, only two types of catalyst formulations have been proposed: Cr_2O_3 supported on Al_2O_3 (processes - Catofin and FFB) and Pt-Sn alloy, supported on Al_2O_3 (Oleflex); spinel $ZnAl_2O_4$/ $CaAl_2O_4$ (STAR) or ZrO_2 (Linde-PDH BASF). Currently, Catofin and Oleflex processes are commercialized; dozens DHP plants are working by these technologies and are planned to launching. This, according to forecasts, will lead to the fact that to the end of 2020, 20 % of the global needs in propylene will be replaced due to its targeted production from propane[14]. The STAR process will be used for the first time at two facilities in the Middle East[15].

It is reported[16] that according to Catofin technology on Cr_2O_3/Al_2O_3 at of 590-650 °C and a pressure of 0,3-0,5 bar, propylene is formed with a selectivity of 82-87 % at a conversion of propane of 48-65 %; and in the Oleflex process on Pt-Sn / Al_2O_3 at 550-620°C, 2-5 bar and propane conversion of 25-40%, propylene selectivity is 89-91%.

The disadvantage of using chromium oxide as a catalyst for the process is its toxicity due to the significant proportion of the carcinogen Cr (VI) contained in it after oxidative regeneration[17]. Catalysts containing platinum – Pt-Sn /Al_2O_3, are expensive and, like Cr_2O_3/Al_2O_3, are subject to a greater degree of particle agglomeration during temperature increase than the initial alumina. Both catalysts are coked

---

[11] Brinkmeyer F.M., Savage K.B. and Bridges S.D. Dehydrogenation process control Pat US. 5243122, Publ. Sept. 07, 1993.

[12] Iezzi R., Bartolini A., Buonomo F., Kotelnikov G. and Bespalov V. Process for obtaining light olefins by the dehydrogenation of the corresponding paraffins Pat. US 6362385, Publ. March 26, 2002.

[13] Heineke D., Baier M., Demuth D. and Harth K. Method and catalyst for producing olefins, in particular propylenes, by dehydrogenation. Pat. US 6576804, Publ. June 10, 2003.

[14] UOP's PP plant using C3 Oleflex technology starts in China. Feb. 03, 2015 (China). URL :.http://www.fibre2fashion.com News

[15] Sattler J.H.B., Ruiz-Martinez J., Santillan-Jimenez E., Weckhuysen B.M. Catalytic Dehydrogenation of Light Alkanes on Metals and Metal Oxides. Chem. Rev. 2014. V. 114, №. 20. P. 10613–10653. URL : https://doi.org/10.1021/cr5002436.

[16] Макарян И.А., Рудакова М.И., Савченко В.И. Промышленные процессы целевого каталитического дегидрирова-ния пропана в пропилен. *Междунар. научн. Жур. «Альтерн. энергетика и экология»*. 2010. Т. 86, № 6. С. 67–81.

[17] Vora B.V. Development of Dehydrogenation Catalysts and Processes. *Top. Catal*. 2012. V. 55. P. 1297–1308. DOI:10.1007/s11244-012-9917-9.

during operation and need periodic regeneration, which is carried out by blowing air and steam, in the case of Cr_2O_3, or by burning coke followed by reduction of Pt in a stream of hydrogen. Such treatment leads to a gradual loss of the initial activity of the catalysts, a decrease in their stability, and therefore they must be replaced after 1-3 years of operation[18]. It is proposed to increase the service life of the Al_2O_3 support by creating its mixed oxide with SiO_2. As the authors of the patent[19] describe, the chromium oxide catalyst on such carriers exhibits greater thermal stability than the Catofin process catalyst.

1. The perspective catalysts for propane dehydrogenation

At the same time, in work[20], the authors compared the catalyst with isolated groups of vanadium oxide – VO_x, supported on a mesoporous ordered silicate system of the MCM-41 type, with CrO_x/MCM-41 and the industrial Pt-Sn/Al_2O_3 catalyst in the same conditions of work and regeneration. They found that VO_x/MCM-41 in both oxidized and reduced form showed longer times work in flow and stability in all DHP cycles, its activity could be completely restored by oxidative regeneration, and that significantly exceeded of industrial samples. In[21,22], the authors further established that an increase in the acidity of the surface of a silicate support for isolated VO_x groups by introducing a certain optimal amount of Al_2O_3 additives into it promotes the formation of carbon deposition centers active in the dehydrogenation of propane,

---

[18] Sattler J.H.B., Ruiz-Martinez J., Santillan-Jimenez E., Weckhuysen B.M. Catalytic Dehydrogenation of Light Alkanes on Metals and Metal Oxides. Chem. Rev. 2014. V. 114**,** №. 20. P. 10613–10653. URL : https://doi.org/10.1021/cr5002436

[19] Ruettinger W. and Jacubinas R. Chromia alumina catalysts for alkane dehydrogenation. Pat. US 8895468, Publ. Novem. 25, 2014.

[20] Sokolov S., Stoyanova M., Rodemerck U., Linke D., Kondratenko E.V. Comparative study of propane dehydrogenation over V-, Cr-, and Pt-based catalysts: Time on-stream behavior and origins of deactivation. *J. Catal*. 2012**.** V. 293. P. 67–75. URL : http://dx.doi.org/10.1016/j.jcat.2012.06.005.

[21] Sokolov S., Stoyanova M., Rodemerck U., Linke D., Kondratenko E.V. Effect of support on selectivity and on-stream stability of surface VO_x species in non-oxidative propane. *Catal. Sci. Technol*. 2014. V. 4. P. 1323–1332 URL : https://doi.org/10.1039/C3CY01083J.

[22] Sokolov S., Bychkov V.Yu., Stoyanova M. Rodemerck U., Bentrup U., Linke D., Tyulenin Y.P., Korchak V.N., Kondratenko E.V. Effect of VOx Species and Support on Coke Formation and Catalyst Stability in Nonoxidative Propane Dehydrogenation. *ChemCatChem*. 2015. V. 7. P. 1691-1700. URL : https://doi.org/10.1002/cctc.201500151.

increasing the time of stable operation of such a catalyst. In[23], it was shown that the modification of MCM-41 by replacing a portion of silicon ions with titanium ions in tetrahedral coordination increases the acidity of its surface and the isolation of supported VO_x groups, a higher propane conversion during its dehydrogenation to VO_x/Ti-MCM-41 and obtaining a higher yield of propylene and hydrogen, compared with VO_x/MCM-41. The productivity and propylene selectivity achieved at 550 °C at 5 % VO_x/Ti-MCM-41 were close to those obtained on the industrial Pt–Sn/Al_2O_3 catalyst used in the Oleflex process.

The vanadium oxide catalysts on various oxide supports were tested and showed the greatest activity in the widely studied process of oxidative dehydrogenation of propane (ODHP). Due to the reaction of the interaction of oxygen and hydrogen released during the DHP: $H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$ (ΔH^0_{298} = - 241,8 kJ/mol), the total ODHP process becomes substantially exothermic (H^0_{298} = - 117,5 kJ/mol) and is not limited to establishing thermodynamic equilibrium. This gives hope for a reduction in energy consumption for the reaction and an increase in the yield of propylene. However, an analysis of scientific articles published before 2007[24] allowed the authors to conclude that the selectivity for propylene achieved in ODHP under conditions leading to a high conversion of propane is still far from commercial interest. Published modern patents for ODHP also do not show high yields of propylene. Relatively high propylene selectivity for propane ODHP is obtained at a limiting oxygen content, which is almost completely used at elevated reaction temperatures and the process proceeds predominantly by the DHP mechanism. But small oxygen additives in the process of DHP, for example, O_2/C_3H_8 = 0,1[25], can increase the propane conversion by ~ 10 %. The authors of[26] noted that both with ODHP and with DHP, an increase in the yield of propylene can be achieved by increasing the

---

[23] Зажигалов В.А., Коновалова Н.Д., Редькина А.В., Хоменко К.Н. Сравнительное исследование дегидрирования пропана на VO_x/MCM-41 и VO_x/Ti-MCM-41 с получением пропилена и водорода. *Укр. хім. журн*. 2013. V. 79. № 11. С. 63–72.

[24] Cavani F., Ballarini N., Cericola A. Oxidative dehydrogenation of ethane and propane: How far from commercial implementation? Catal. Today. 2007. V. 127. P.113–131. URL : https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.05.009.

[25] Nawaz Z. Light alkane dehydrogenation to light olefin technologies: A comprehensive review.*Rev. Chem. Eng.* 2015. V. 31, № 5. P. 413–436. URL : https://doi.org/10.1515/revce-2015-0012

[26] Cavani F., Ballarini N., Cericola A. Oxidative dehydrogenation of ethane and propane: How far from commercial implementation? Catal. Today. 2007. V. 127. P. 113–131. URL : https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.05.009.

surface area of the catalysts and changing their porous structure and chemical nature, which can initiate the additional passing of the high-temperature radical homogeneous reactions. The formation of free radicals in such reactions can occur on the active sites of the surface of the catalysts (heterogeneous onset of homogeneous reactions) and they can be more selective than a completely heterogeneous process.

At present, the supported vanadium oxides are ones of the most promising alternative catalysts for process DHP to propylene without the presence of oxygen in the reaction mixture[27]. Wherein, the onset of the DHP reaction on VO_x/Al_2O_3 authors explain by the formation of propyl radicals associated with vanadium.

As a support, alternative to alumina, for the catalysts of the dehydrogenation light alkanes, the effect of ZrO_2 has been studied in sufficient detail. Zirconium dioxide is considered as an ideal support for oxides transition metals[28]. It is chemically stable, inactive in oxidative reactions, has weak amphoteric properties and interacts well with transition metals, contributing to their highly dispersed surface location and inhibiting them sintering. In the DHP the activity of the Cr_2O_3/ZrO_2 catalyst was significantly higher than that of the samples of Cr_2O_3 supported on Al_2O_3 or SiO_2. This was explained by the more isolated arrangement of active sites on the surface of zirconium dioxide and the presence of oxygen anionic vacancies involved in the dissociative adsorption of propane[29]. However, the possible relatively large ZrO_2 surface (~ 300 m^2/g), obtained by drying amorphous $Zr(OH)_4$, significantly decreases during its further calcination in air at high temperatures[30]. This is due to the growth and agglomeration of crystallites by the mechanism of surface diffusion and lead to a change in

---

[27] Liu G., Zhao Z.-J., Wu T., Zeng L., Gong J. Nature of the Active Sites of VO_x/Al_2O_3 Catalysts for Propane Dehydrogenation. ACS Catal. 2016.V. 6, № 8. P. 5207–5214. http:// DOI: 10.1021/acscatal.6b00893.

[28] Yamaguchi T. Application of ZrO_2 as a catalyst and a catalyst support. *Catal. Today*. 1994. V. 20. P. 199–217. https://doi.org/10.1016/0920-5861(94)80003-0.

[29] DeRossi S., Ferraris, G., Fremoiotti S., Garrone E., Ghiotti G., Campa M.C., Indovina V. Propane Dehydrogenation on Chromia/Silica and Chromia/Alumina Catalysts. *J. Catal*. 1994, V. 148. P. 36–46. URL : https://doi.org/10.1006/jcat.1994.1183.

[30] Cimino A., Cordischi D., DeRossi S., Ferraris G., Gazzoli D., Indovina V., Minelli G., Occhiuzzi M., Valigi M. Studies on chromia/zirconia catalysts I. Preparation and characterization of the system. *J.Catal*. 1991. V. 127. P. 744–760. URL : https://doi.org/10.1016/0021-9517(91)90196-B.

the modifications the formed crystalline ZrO_2 phase. It was shown[31] that the thermostability of ZrO_2 can be improved by preliminary dispersing a monolayer of the active component on its surface, which, separating the crystallites of the support from each other, prevents their growth to critical sizes. In this case, a much larger surface area of the catalyst is obtained after the impregnation of zirconia hydrogel with solutions of salts of active elements than when its xerogel is impregnated.

The state of ZrO_2 it is stabilizes and under the synthesis of its mixed oxide with SiO_2[32]. This allows not only to create a support with a developed surface and porous structure, but also with a greater strength of acid sites active in DH processes[33]. The chromium-containing zirconium-silicate xerogels Cr/Si/Zr/O were tested as catalysts for DHP and it was shown[34] that they are much more active at lower temperatures, in comparison with Cr/Si/Al/O, and exhibit 100 % selectivity to propylene. It should be noted that recently, zirconia promoted by metal oxides, increasing the number of active structural anionic vacancies, is considered as an alternative type of unconventional catalysts with a defective structure, capable of replacing spent catalysts for non-oxidative dehydrogenation of light alkanes containing Cr or Pt[35,36].

Based on the positive results obtained in the process of DHP on vanadium oxide supported on Ti-MCM-41 and Cr-containing zirconium

---

[31] Zhao B.Y., Xu X.P., Ma H.R., Sun D.H., Gao J.M. Monolayer dispersion of oxides and salts on surface of ZrO_2 and its application in preparation of ZrO_2-supported catalysts with high surface areas. *Catal. Letters*. 1997. V. 45. P. 237–244. URL : https://doi.org/10.1023/A:1019048503124.

[32] del Monte F., Larsen W., Mackenzie J.D.: J Stabilization of Tetragonal ZrO_2 in ZrO_2–SiO_2 Binary Oxides. *Am. Chem. Soc*. 2000. V. 83. P. 628-634. URL : https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01243.x.

[33] Tanabe K., Yamaguchi T. Acid-base bifunctional catalysis by ZrOa and its mixed oxides. *Catal. Today*. 1994. V. 20. P. 185–197. URL : https://doi.org/10.1016/0920-5861(94)80002-2.

[34] Fujdala K.L., Tilley T.D. Thermolytic molecular precursor routes to Cr/Si/Al/O and Cr/Si/Zr/O catalysts for the oxidative dehydrogenation and dehydrogenation of propane. *J. Catal*. 2003. V. 218. P. 123–134. URL : https://doi.org/10.1016/S0021-9517(03)00141-6.

[35] Otroshchenko T., Bulavchenko O., Thanh H. V., Rabeah J., Bentrup U., Matvienko A., Rodemerck U., Paul B., Kraehnert R., Linke D., Kondratenko E.V. Controlling activity and selectivity of bare ZrO2 in non-oxidative propane dehydrogenation. *Appl.Catal. A: Gen*. 2019. V. 585. P. 117189–117199. URL : https://doi.org/10.1016/j.apcata.2019.117189.

[36] Jeon N., Choe H., Jrong B., Yun Y. Cu-promoted zirconia catalysts for non-oxidative propane dehydrogenation. *Appl.Catal. A: Gen*. 2019. V. 586. P. 117211–117219. URL : https://doi.org/10.1016/j.apcata.2019.117211.

silicate xerogel in the previous work[37], we studied the properties of the micro-mesopores zirconium-silicate (Zr-Si) xerogels, which also modified with titanium dioxide (Zr-Si(Ti)), qua as supports of vanadium oxide for DHP catalysts. It was shown that on V_2O_5/Zr-Si and V_2O_5/Zr-Si(Ti), at a shorter contact time of the reaction mixture, the higher propylene yield was obtained than on V_2O_5/Ti-MCM-41, which has a structure with regular hexagonal packing of cylindrical mesopores of the same diameter. But under a longer contact time, after 550 °C, the propylene yield on vanadium-zirconium-silicate catalysts became lower. It was concluded that the system of tortuous micro-mesopores of the Zr-Si xerogel can impede the development of the DHP reaction by a heterogeneous-homogeneous mechanism.

In this work, the task was set to increase the specific surface, change the porous structure of the V_2O_5/Zr-Si and V_2O_5/Zr-Si(Ti) catalysts, and determine the influence of these parameters on reaction of the propane dehydrogenation.

2. Experimental part

Spherically granular highly dispersed porous ZrO_2–SiO_2 oxide was obtained by methods, of the direct sol-gel synthesis and the droplet coagulation of the zirconium silicate hydrogel[38], using the aqueous solutions of the accessible salts of element, with concentrations necessary for the obtaining the Zr / Si = 0.6 ratio in the synthesis sol, according to the following reactions:

$$2\ K_2CO_3 + ZrOCl_2 \rightarrow K_2\,[ZrO(CO_3)_2],$$

$$K_2\,[ZrO(CO_3)_2] + Na_2SiO_3 \rightarrow ZrO_2.\ SiO_2\ .\ n\ H_2O$$

A solution of the zirconium carbonate complex at a rate of 164 ml / min. and a sodium metasilicate solution at a rate of 100 ml/min, was fed to a flow reactor in which the solutions were mixed to form a mixed sol of zirconium oxyhydrate and silicic acid. The sol stream was directed into a column filled with two layers of liquids. The top layer is

[37] Редькина А.В., Коновалова Н.Д., Кравченко Н.В., Стрелко В.В. Дегидрирование пропана в пропилен на V_2O_5, нанесенном на микро-мезопористую систему оксидов ZrO_2-SiO_2-TiO_2.*Укр. хім. журн*. 2018. Т. 84, № 7. С. 43–59.

[38] Яковлев И.І., Стрелко В.В., Кравченко М.В. Золь-гель спосіб одержання сферично гранульованого високо поруватого цирконій силікату. Опис до патенту на корисну модель. UA 105999 U, опубл. 10.04.2016, Бюл. № 7.

undecane, and the bottom is running tap water. During the passage of the undecane layer (1.0–1.5 m.), The sol droplets turned into spherical granules of Zr-Si hydrogel, which were transported by water and first fell onto a sieve, and then into a container where they were washed with distilled water from alkalis, salts and traces of undecane. Excess external moisture was carefully removed from the gel spheres, dried at 130°C, determining the moisture capacity of the hydrogel matrix.

The modification of Zr-Si oxide with titanium dioxide was carried out by adding a $TiCl_4$ solution to the synthesis gel[39] so that the amount of added TiO_2 was 3 wt. % from mass SiO_2. This value was chosen for comparison, as the maximum amount of titania that can be introduced into the MCM-41 system without destroying its structure[40]. The molar ratio of ZrO_2 / SiO_2 / TiO_2 oxides in the gel was 0.6/1/0.02. The granules of the hydrogel sample were designated Zr-Si(Ti).

Since compounds containing tetravalent V show a high degree of vanadium incorporation into the porous silicate matrix[41], vanadium oxide was supported on Zr-Si hydrogels from solution of $VOSO_4$ salt. The hydrogel spheres without external moisture were poured with a 10% solution of $VOSO_4$ in an amount not exceeding the moisture capacity of the hydrogel matrix, so that ~ 8% V was residue on the `support after drying, The sample was left for two days in order to the vanadium salt diffused into the gel spheres. Then, draining the excess liquid, it was flooded by a solution of NH_4OH so that ammonia precipitated vanadium hydroxide in the pores of the support. A part of the hydrogel spheres then was dried and calcined in air at 450 °C.

The other part spheres of hydrogel with supported vanadium oxide was placed in steel autoclave and subjected to hydrothermal treatment (HTT) at 250 °C for 5 hours. This treatment helps to strengthen the bond of the gels elements in their polymer framework and can lead to the production of xerogels with a larger specific surface and pore volume after calcination[42]. Then the samples was removed from the autoclave

---

[39] Редькіна А.В., Коновалова Н.Д., Стрелко В.В. Способ одержання каталізатора дегідрування пропану в пропілен. Опис до патенту на корисну модель UA 131758 U, опубл. 25.01.2019, бюл. № 2.

[40] Koyano K.A., Tatsumi T. Synthesis of titanium-containing MCM-41. *Microporous Material*. 1997. V. 10: P. 259–271. https://doi.org/10.1016/S0927-6513(97)00016-3.

[41] Selvam P., Dapurkar S.E. The effect of vanadium sources on the synthesis and catalytic activity of VMCM-41// J. Catal. – 2005. – Vol. 229. – P. 64–71. URL : http://dx.doi.org/10.1016/j.jcat.2004.10.005

[42] Raju V., Jaenicke S., Chuah G.-K. Effect of hydrothermal treatment and silica on thermal stabilityë and oxygen storage capacity of ceria–zirconia. *Appl. Catal. B*. 2009. V. 91. P. 92–100 https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.05.01

and one of its parts was decanted with alcohol and left under it for 12 hours. Thereplacing intermicellar water in hydrogels with alcohol or another organic liquid with a low surface tension, which reduces of force compression of the capills in the gel skeleton during drying, leads to an increase in the volume and pore diameter of the obtained samples[43]. After that, both parts of the samples after HTT were dried and calcined. All the prepared samples were designated as V-Zr-Si and V-Zr-Si(Ti).

Isotherms of low temperature nitrogen adsorption were measured according to the standard procedure on an ASAP 2405 N Micromeritics instrument, after vacuum treatment at 200 °C. The pore size distribution of the radii was calculated using the DFT density functional theory.

An analysis of the microstructure and elemental composition of the obtained catalysts was determined by scanning electron microscopy (SEM) using a JEOL JSM 7001F scanning electron microscope with an Oxford Instruments microanalyzer system.

X-ray diffraction patterns were recorded on a DRON-4-07 diffractometer using Cu Kά radiation from the anode line with a Ni filter in the reflected beam with Bragg – Brentano geometry.

The DHP reaction was carried out in a flowing quartz reactor 30 cm long, 0,7 cm in diameter, using 0,85 g catalyst weights with a volume of 1 cm^3 placed in the middle of the reactor. The flow of the working mixture containing 7 vol. % propane in argon, was maintained at 18 ml/min and its contact time with the catalyst (τ) 3.5 s. After holding the samples in the reaction mixture for at least an hour at 250–300°C, the temperature of the reactor was increased by 25°C every 30 minutes to 650–675°C. Propane and the products of its dehydrogenation reaction – propylene (C_3H_6), methane, ethane, and ethylene (C_xH_y) were analyzed on a chromatographic column, filled with silica gel, using a flame ionization detector. The catalytic parameters were determined as the degree of propane conversion - X (C_3H_8), product selectivity - S (C_3H_6), S (C_xH_y) and propylene yield - Y (C_3H_6)

3. Results and discussion

The general texture parameters of the obtained catalysts are given in the table 1.

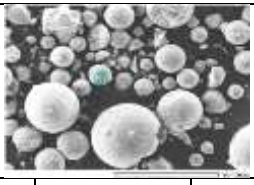
[43] He X., Zhang H., Li Y., Hong Ch., Zhao J. Preparation and Structural Characterization of SiO2-ZrO2 Aerogels. *Key Eng. aterials*. 2007. V. 336-338. P. 2282–2285. URL : https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.336-338.2282

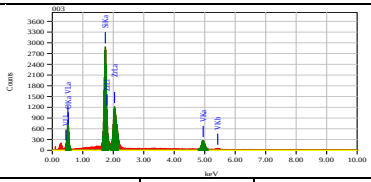
Table 1

Textural parameters V-Zr-Si and V-Zr-Si(Ti)

Sample	Sequential processing *	Specific surface area S_{BET}, m^2/g	Total pore volume , V_{Σ}, cm^3/g	Diameter mesopore D_{DFT}, A°	Average pore diameter , A°
V-Zr-Si	D, C	234	0,1699	50,86	29,04
V-Zr-Si(Ti)	D, C	250,9	0,184	50,86	29,34
V-Zr-Si	HTT, D, C	303,7	0,4834	70,32	63,66
V-Zr-Si(Ti).	HTT, D, C	303,1	0,4341	70,32	57,3
V-Zr-Si	HTT, DE, D, C	358,1	0,7056	81,44	78,82
V-Zr-Si(Ti).	HTT, DE, D, C	316,5	0,6571	81,44	83,04

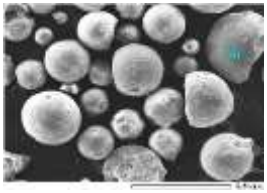
**- drying – D, calcination – C, hydrothermal treatment, – HTT, decantation with ethanol – DE*

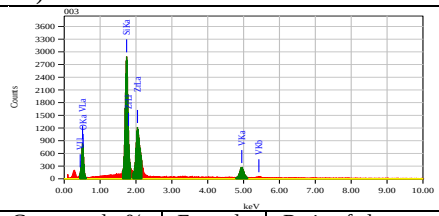




Element	Weighting %	Atomic %	Compounds, %	Formula	Ratio of elements
Si K	21,58	20,45	46,16	SiO_2	Zr/Si = 0,47
V K	5,57	2,91	9,95	V_2O_5	Si/Zr = 2,16
Zr L	32,49	9,48	43,89	ZrO_2	V/Si = 0,14
O	40,36	67,15			
Total	100	100	100		

a)





Element	Weighting %	Atomic %	Compounds, %	Formula	Ratio of elements
Si K	22.78	21,14	48,74	SiO_2	Zr/Si = 0,40
Ti K	0,50	0,27	0,83	TiO_2	Si/Zr = 2,47
V K	5,66	2,9	10,11	V_2O_5	Ti/Si = 0,013
Zr L	32,49	8,53	40,32	ZrO_2	V/Si = 0,14
O	41,21	67,16			
Total	100	100	100		

b)

Fig. 1. Image of SEM. Electronic spectra and tables of elements distribution for sample of dried and calcined hydrogels V-Zr-Si (*a*) and V-Zr-Si(Ti) (*b*)

As can be seen from the table, the sequential hydrothermal treatment of the hydrogels of the samples impregnated with the vanadyl sulfate salt and their additional decantation with ethanol leads to an increase in the specific surface area, volume, and pore width of the obtained catalysts. Fig. 1 shows of image catalysts and results of the quantitative measurement contents of elements in their the surface layer as defined by scanning electron microscopy for samples, obtained by supporting of vanadium oxide on wet hydrogels Zr-Si and Zr-Si (Ti) after them drying and calcining. It is also seen that the amount of ZrO_2 in the obtained catalysts is less than it was in the sol of synthesis and corresponds to a Zr / Si ratio of ~ 0.4 - 0.47 and the SiO_2 content in mixed oxides is higher than ZrO_2. The average amount of supported vanadium oxide in both catalysts is approximately 10 wt. % V_2O_5. The average Si / Zr ratio in both samples is 2.16 - 2.47, this is close to 2, which, according to the Tanabe rule, approximately corresponds to the maximum Brainsted acidity of mixed ZrO_2-SiO_2 oxides and theirs the Hammett acidity function can be $H_0 \geq -8.2$[44].

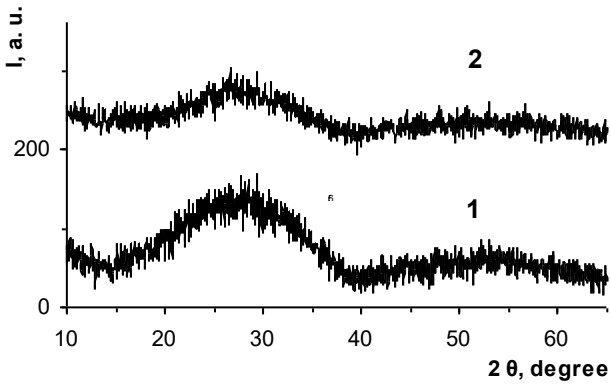


Fig. 2. X-ray diffraction patterns samples: of V-Zr-Si – *1* and V-Zr-Si(Ti) – *2*

[44] Bosman, H.J.M., Kruissink, E.C., Van der Spoel, J., Van den Brink, F.: Characterization of the acid strength of ZrO2 SiO2 mixed oxides. *J. Catal.* 1994, V. 148. P. 660-672. URL : https://doi.org/10.1006/jcat.1994.1253.

X-ray phase analysis carried out in the range of reflection angles $2\theta = 10 - 70°$ for these synthesized catalysts (Fig. 2), showed the presence of only an amorphous halo on the diffraction patterns of samples. The absence of phase reflections of vanadium oxides may indicate their highly dispersed state on the surface of supports. The absence of phase reflections of metastable tetragonal zirconium dioxide t-ZrO_2, which usually appears already at 400 °C upon calcination of the dried hydrogel ZrO_2[45] is consistent with the data, which showed that the amorphous SiO_2 matrix, at its content ≥ 50% in binary oxide ZrO_2-SiO_2, contributes to the preservation of the amorphous state of ZrO_2 to high calcination temperatures[46].

Nitrogen adsorption / desorption isotherms of catalysts, obtained by drying and calcining vanadium-containing hydronels (Fig. 3, a) belong to type IV isotherms with H2 hysteresis loops[47]. The desorption branch in isotherms has a rather large horizontal part, characteristic of corpuscular systems, the pores of which are of an indefinite nature with narrow “throats” and various wider cavities. This is also confirmed by distribution of pores by radius sizes characteristic of micro-mesoporous systems (Fig. 3, b). In this case, the texture parameters of the sample, modified with titanium dioxide, show large values of the specific surface area and volume of pores (table).

The HTT of V-Zr-Si and V-Zr-Si(Ti) hydrogels before their calcining (Fig. 4) changes the shape of the hysteresis loop on the isotherms – the horizontal parts on the desorption branchs becomes shorter, indicating that the difference between the diameters of the “throats” and “cavities” in the porous structure of the catalyst decreases and the type of the hysteresis loop H2 transforms into H1, which is typical for systems with a developed mesoporous structure. Decantation of the sample with ethanol after HTT leads to a narrowing of the shape of the hysteresis loop on the isotherms, indicating an additional equalization of sizes pore radiuses.

---

[45] Li M., Feng Z., Xiong G. Ying P., Xin Q., and Li C. Phase Transformation in the Surface Region of Zirconia Detected by UV Raman Spectroscopy. *J. Phys. Chem. B*, 2001, V.105. P. 8107-8111. https://doi.org/10.1021/jp010526l

[46] del Monte F., Larsen W., Mackenzie J.D.: J Stabilization of Tetragonal ZrO_2 in ZrO_2–SiO_2 Binary Oxides. *Am. Chem. Soc*. 2000. V. 83. P. 628-634. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01243.x.

[47] Sing K. S. W., Everett D. H., Haul R. A. W., Moscou L., Pierotti R. A., Rouquerol J. and Siemieniewska T. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*. 1985. V. 57, No. 4. P. 603–619. https://doi.org/10.1351/pac198254112201

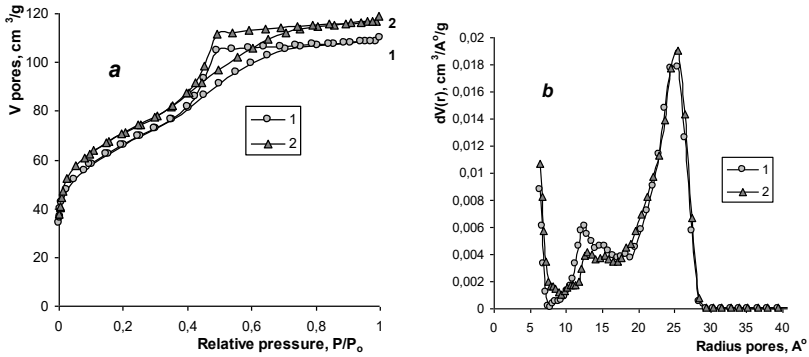


Fig. 3. Low-temperature nitrogen adsorption/ desorption isotherms (*a*) and the nature of the pore size distribution of the radiuses (*b*) for the samples V-Zr-Si – *1* and V-Zr-Si(Ti) – 2 dried at 130° C and calcined at 450°C

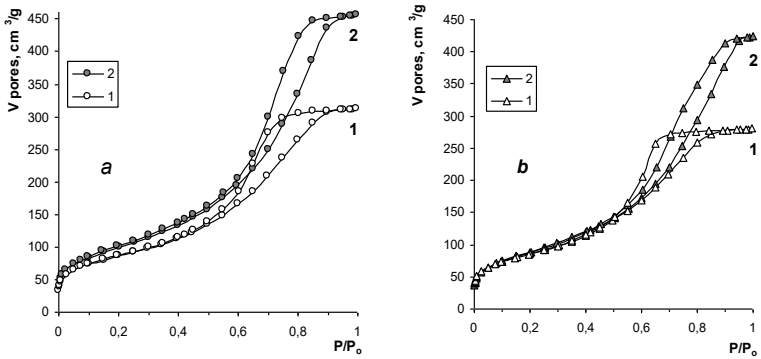


Fig. 4. Low-temperature N_2 adsorption isotherms of V-Zr-Si (*a*) and V-Zr-Si (Ti) (*b*) hydrogels, which are subjected to hydrothermal treatment at 250°C – *1*, then decanted with alcohol – *2* and then dried at 130°C and calcined at 450°C

The spacious order in the distribution of pores by the size of radiuses of samples after their HTT and decantation with ethanol also changes. The micropores disappear, the radius of the mesopores increases and their size distribution becomes close to uniform (Fig. 5). The specific surface area of the catalysts increases on 50 ~ 70 m^2/g, the pore volume

in 2,5 – 3 times, the diameter of the mesopores – to 7 nm. At decanting by ethanol, the volume pores increases by another 1,5 times, a specific surface area of V-Zr-Si - on 50 m^2/g and the diameter of the mesopores becomes more than 8 nm (table). However, despite the narrower and more uniform distribution of pores by the size of the radiuses at the sample V-Zr-Si (Ti), it is more sharply violated after decantation with alcohol and its specific surface becomes lower, than that of V-Zr-Si.

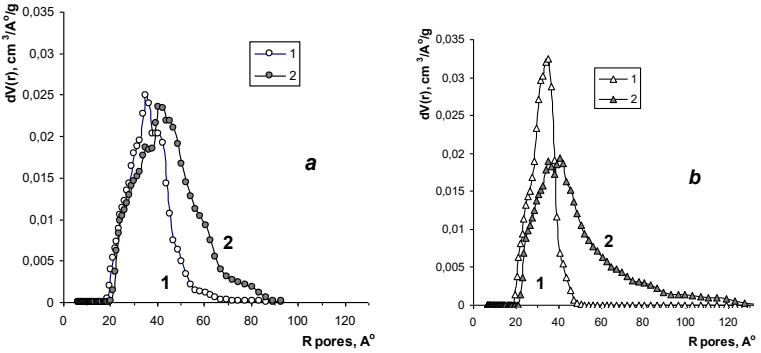


Fig. 5. Calculation of pore size distribution by radiuses by DFT method for V-Zr-Si (*a*) and V-Zr-Si (Ti) (*b*) hydrogels subjected to hydrothermal treatment at 250 °C – *1*, then decanted with alcohol – *2* and after both samples are dried and calcined

This affects the change in the catalytic characteristics of the compared systems (Fig. 6). It can be seen that V-Zr-Si (Ti), which is not subject to HTT, is noticeably more active than the V-Zr-Si sample, which does not contain titanium in the structure. After the HTT, the yields of the obtained propylene on these catalysts are almost compared. But after decantation with alcohol, the value of Y C_3H_6 on V-Zr-Si (Ti) exceeds that obtained on V-Zr-Si only at relatively low reaction temperatures. Such a phenomenon could be explained by the removal of titanium ions from the structure of the support during the HTT or during decantation with alcohol. It is known[48], that the hydrolytic stability of Si-Ti bonds in mesoporous titanosilicates is non high.

[48] Халдеева О.А., Трухан Н.Н. Мезопористые титан-силикаты как катализаторы процессов жидкофазного селективного окисления органических соединений. *Успехи химии*. 2005. Т. 75, № 5. С. 460–483.

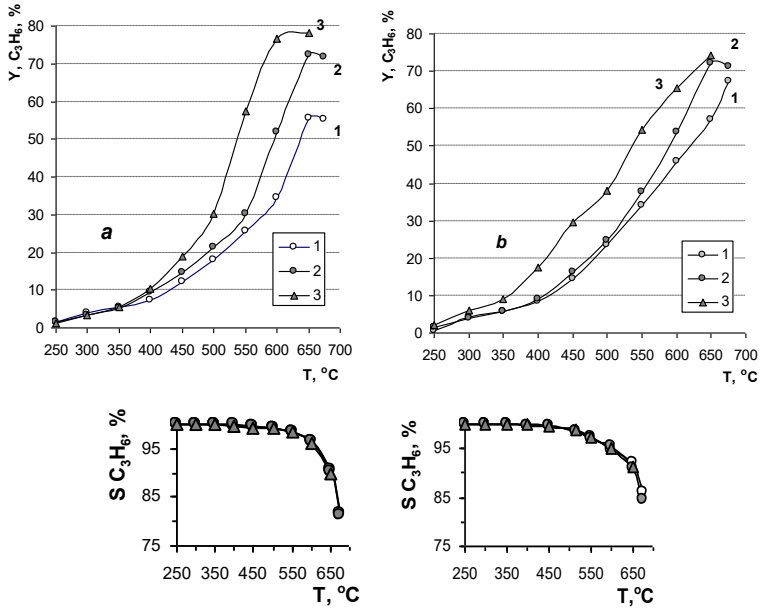


Fig. 6. The yield and selectivity of formation propylene in dehydrogenation of propane on catalysts of V-Zr-Si (*a*) and V-Zr-Si(Ti) (*b*), obtained by diffusion of vanadium into the matrix zirconium silicate hydrogel and then: dried at 130 °C and calcined at 450 °C – *1*, previously hydrothermally treated at 250 °C – *2*, after HTT is decanted by ethanol – *3*. The reaction mixture is 7% C_3H_8 in argon. Contact time – 3.5 s

The selectivity of propylene formation in all samples (inserts in Fig. 6 a, b) is almost the same and is close to 100% up to a reaction temperature of 500°C. Then it gradually decreases to a level of ~ 90% with increasing temperature to 650 °C. In this case, the yield of propylene in this temperature range increases, since the degree of conversion of propane increases, despite the inevitable deposition of coke on the surface of the catalysts. This may be due to the fact that, according to the authors of[49], coke on the surface of vanadium oxide

[49] Sokolov S., Stoyanova M., Rodemerck U., Linke D., Kondratenko E.V. Effect of support on selectivity and on-stream stability of surface VO_x species in non-oxidative propane. *Catal. Sci. Technol*. 2014. V. 4. P. 1323–1332. URL : https://doi.org/10.1039/C3CY01083J.

catalysts on acid supports forms less active sites than VO_x, whichare involved in the activation of propane and increase its conversion. In this work it was showed also, that the catalysts exhibited excellent ability to restore their initial activity after 2 h of oxidative regeneration at 550°C. In this our work, the regeneration of catalysts after DHP was carried out by their slow cooling in an air stream in an inertial reactor furnace from 650–675°C to room temperature. This treatment restored the initial color and structure of the catalysts and almost completely returned their catalytic activity.

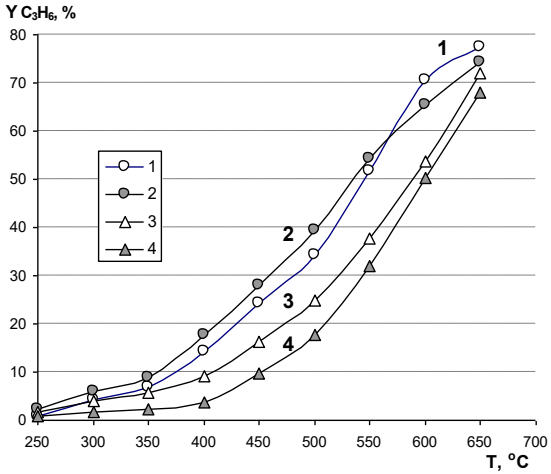


Fig. 7. The propylene yield in the process DHP on catalysts V-Zr-Si – *1* and V-Zr-Si(Ti) – *2*, obtained during under HTT and decantation with ethanol; V-Zr-Si(Ti) under HTT – *3*; and 10% V_2O_5 /Ti-MCM-41 – *4*

The average yields of propylene obtained on these catalysts, after several cycles of reaction and regeneration, are shown in Fig. 7. They are compared with a sample obtained by HTT without alcohol and a catalyst with the same amount of vanadium oxide – 10 wt. %, supported on a titanosilicate ordered mesoporous system with hexagonal packing of homogeneous cylindrical mesopores – Ti-MCM-41, obtained by

hydrothermal synthesis[50]. As can be seen, the development of the porous structure of zirconium silicates obtained by the sol-gel method, using the subsequent hydrothermal treatment and decantation with ethanol, can significantly increase the yield of propylene on the supported vanadium oxide in the process of DHP to propylene and lower the temperature when it reaches its maximum values. On fig. 8, the change in the range of size and pore volume of the studied catalysts is compared graphically.

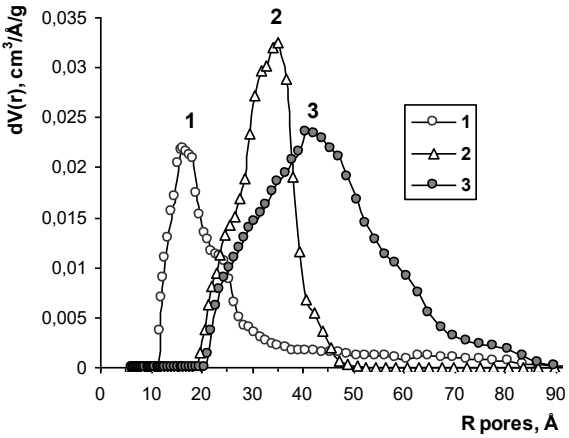


Fig. 8. Comparison of the pore size distribution of radiuses, calculated by the DFT method for catalysts: 10% V_2O_5 /Ti-MCM-41 – *1*, V-Zr-Si(Ti) – *2*, obtained during under HTT and V-Zr-Si – *3*, obtained under HTT and decantation with ethanol

In[51] , previously suggested that for the effective operation of the V_2O_5 / Ti-MCM-41 catalyst both in the process of dehydrogenation and oxidative dehydrogenation of propane, it is necessary to ensure the optimal number of active interactions of propane and the formed propylene with active catalytic sites on surface of the walls of

[50] Редькина А.В., Коновалова Н.Д., Хоменко К.Н. Дегидрирование пропана на V_xO_y/H-Ti-MCM-41. *Химия, физика и технология поверхности*. 2014. Т. 5, № 2. С. 174–189.

[51] Редькина А.В., Коновалова Н.Д., Хоменко К.Н. Дегидрирование пропана на V_xO_y/H-Ti-MCM-41. *Химия, физика и технология поверхности*. 2014. Т. 5, № 2. С. 174–189.

mesopores, which causing activation of molecules with the continuation of the reaction on the surface and in the pore volume. This is facilitated by the optimal ratio between the acidity of the active sites, estimated, for example, from the adsorption of ammonia – A, in ml /g, and the volume of catalyst mesopores - V_{DFT} (ml /g). The highest yields of propylene are in a certain optimal range of A /V_{DFT} variation.

The data obtained in this work confirm this assumption. The acidity of mixed ZrO_2 SiO_2 oxides[52] is significantly higher than that of Ti-MCM-41. Therefore, in order to avoid strong adsorption of propylene, which is of a basic nature, on the acid sites of the catalyst and its destruction, the volume and pore diameter of the support ZrO_2 SiO_2 should be much larger than that of Ti-MCM-41, in order to obtain a high yield of C_3H_6 during the propane dehydrogenation. That is obtained in practice. The increased acidity of ZrO_2 SiO_2, providing easier activation of neutral propane, can contribute to lowering the temperature of obtaining high yields of propylene.

It is desirable to compare the effect of the composition and structure of catalysts on the course of the DHP process under similar conditions. In article[53], authors noted that tests of the catalytic activity of Pt-Sn /Al_2O_3 were carried out under conditions close to industrial, namely, at an hourly average velocity of the gas mixture per unit mass of catalyst (weight hour space velocity) – WHSV = 2 h^{-1}. The reaction mixture consisted of a streams of propane and hydrogen in the ratio H_2/HC = 1 diluted with nitrogen (not indicated to what extent) was supplied at a rate of 18 ml /min per 1 g of catalyst, with a specific surface area of 196 m^2 /g and pore volume in 0.5 cm^3 /g. As a result, at 600°C with a propane conversion of ~ 40 mol. % and propylene selectivity of ~ 90 mol. % its yield in ~ 35 mol % was obtained. These results are typical of the Oleflex process and are consistent with those reported in[54].

---

[52] Bosman, H.J.M., Kruissink, E.C., Van der Spoel, J., Van den Brink, F.: Characterization of the acid strength of ZrO2 SiO2 mixed oxides. *J. Catal.* 1994, V. 148. P. 660-672. URL : https://doi.org/10.1006/jcat.1994.1253.

[53] Sahebdelfar S., Tahriri Zangeneh F. Dehydrogenation of Propane to Propylene Over Pt-Sn/Al_2O_3 Catalysts: The influence of operating conditions on product selectivity. *Iranian J.Chem. Eng*. 2010. V. 7, №. 2. P. 51–57.

[54] Макарян И.А., Рудакова М.И., Савченко В.И. Промышленные процессы целевого каталитического дегидрирования пропана в пропилен. *Междунар. научн. журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2010. Т. 86, № 6. С. 67–81.

The data article[55] it is more correctly to compared with our results. In this study, the reaction mixture contained 40 vol. % C_3H_8, 60 vol. % N_2 and it was fed into the reactor at a rate of 3 ml / min. Thus, 1.2 ml/ min of C_3H_8 entered the reactor. In our work, a mixture, containing 7 vol. % C_3H_8 in argon, at a feed rate of 18 ml/min to the catalyst, gave the same stream of pure propane - 1.26 ml/min. On fig. 9, the catalytic characteristics of the V-Zr-Si (Ti) catalyst, obtained under HTT and decantation by alcohol, after several cycles of its work and regeneration in DHP, are compared with the data of the catalytic parameters of the samples, which studied in the cited paper.

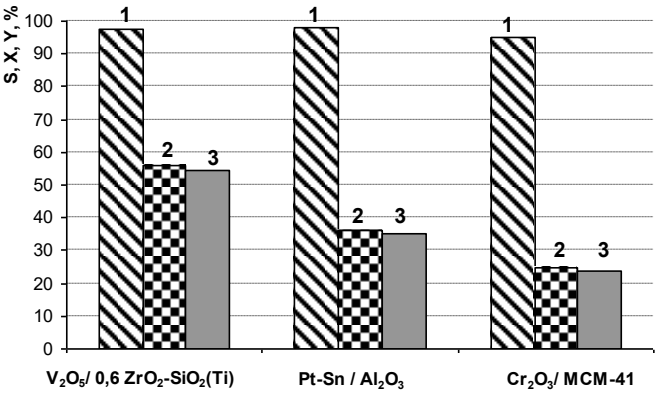


Fig. 9. Comparison of the degree of conversion of propane – *2*, the selectivity of the formation of propylene – *1* and its yield – *3* during the propane dehydrogenation at 550 °C on industrial catalyst of the Oleflex process – Pt-Sn/Al_2O_3 and Cr_2O_3 /MCM-41, according data to[56] and on the obtained catalyst V_2O_5-ZrO_2-SiO_2(Ti)

[55] Sokolov S., Stoyanova M., Rodemerck U., Linke D., Kondratenko E.V. Comparative study of propane dehydrogenation over V-, Cr-, and Pt-based catalysts: Time on-stream behavior and origins of deactivation. *J. Catal*. 2012. V. 293. P. 67–75. URL : http://dx.doi.org/10.1016/j.jcat.2012.06.005.

[56] Sokolov S., Stoyanova M., Rodemerck U., Linke D., Kondratenko E.V. Comparative study of propane dehydrogenation over V-, Cr-, and Pt-based catalysts: Time on-stream behavior and origins of deactivation. *J. Catal*. 2012**.** V. 293. P. 67–75. URL : http://dx.doi.org/10.1016/j.jcat.2012.06.005.

It can be seen that with the same high selectivity of propylene formation, its yield on the obtained vanadium-zirconium-silicate catalyst is significantly higher than on the well-known industrial catalysts of the Oleflex and Catofin processes. Facing, the manufacturability of the process for producing of the V_2O_5-Zr-Si catalyst, the relative cheapness of its composition, ease of regeneration, it can assume, that in the future it can serve as a replacement for the depleted industrial catalysts of DHP processes

CONCLUSIONS

The vanadium oxide used in this catalyst works stably, both in the oxidized and in the reduced state, and is also the active phase of the developed catalysts for the exothermic, energy-saving process of oxidative dehydrogenation of propane. Therefore, the regeneration of this catalyst during DHP can be a simple transition to its ODHP without stopping the dehydrogenation process itself. Applied cheap technology for the synthesis of a support of such a catalyst from accessible salts of elements with obtain solid spherical granules, allows its use in a fluidized bed of catalyst, allowing the conducting, of reaction in an unsteady mode with an increase in the yield of the product.

Currently, new propylene production plants are being built in the United States due to increased production of propane, which was the result of an increase in gas production at the country's shale deposits[57]. Companies of China are also very interested in propane dehydrogenation (PDH) technology used to produce propylene. UOP LLC Honeywell Company announced that its second propylene production unit using propane dehydrogenation technology using the C3 Oleflex process was commissioned in China in Shaoxing, Zhejiang[58]. Zhejiang Shaoxing Sanjin Petrochemical Co., Ltd in this factory will produce 450,000 MTA of propylene and 600,000 tons of polypropylene per year. UOP LLC Honeywell Company (NYSE: HON) also announced on June 11, 2015 that its C3 Oleflex process will be used in Poland by Grupa Azoty and will produce 400,000 metric tons of high-quality propylene per year, sufficient to support the production of nearly 11 million vehicles in year.

[57] Синицин М.В. Влияние «сланцевой революции» в США на американскую и мировую экономику. С. 22–26 в кн. Перестройка мировых энергетических рынков: Возможности и вызовы для России / Под ред С.В. Жукова. Москва : ИМЭМОРАН, 2015. 152 с.

[58] UOP's PP plant using C3 Oleflex technology starts in China. February 03, 2015 (China). URL : http://www.fibre2fashion.com›.

The new block in Szczecin – the region of Poland, planned to launch in 2019[59].

Since Ukraine has the leading zirconium reserves in the world, the production of catalysts based on it and the replacement of expensive platinum-containing catalysts in Oleflex technology would be a promising task.

SUMMARY

It has been analysis of the challenges facing the industry of targeted catalytic dehydrogenation of propane to propylene, which is valuable intermediate in the chemical industry and serves as the basis for the production of many chemical products. It has been consider the most promising catalysts for this process. Using direct sol-gel synthesis, spherically granulated micro-mesoporous zirconium silicate hydrogels, also modified with titanium dioxide, were obtained from the available salts of the elements. The supported vanadium oxide catalysts were obtained by impregnating them with a vanadyl sulfate salt. It was shown that their preliminary hydrothermal treatment and decantation with alcohol makes it possible to increase the specific surface area of the catalysts, the volume and width of their pores, and form a developed mesoporous structure. This leads to a significant increase in the yield of propylene and allows to lowering the temperature for to obtaining its high values. It was shown that the obtained catalysts can in the prospect replace expensive or toxic Pt- and Cr-containing industrial catalysts. The methods used are scanning electron microscopy with microprobe analysis, X-ray phase analysis, nitrogen adsorption / desorption, and gas chromatography.

REFERENCES

1. Брагинский О.Б. Мировая нефтехимическая промышленность. Москва : Наука, 2003, 556 с.
2. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты органических и неорганических веществ. Часть II. СПб. НПО «Профессионал», 2007, 1144 с.
3. Макарян И.А., Рудакова М.И., Савченко В.И. Промышленные процессы целевого каталитического дегидрирования пропана в пропилен. *Междунар. научн. журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. 2010. Т. 86, № 6. С. 67–81.

[59] Honeywell UOP to Power Europe's Largest Production Unit for Plastics Building Block. June 11, 2015. URL : http://www.uop.com.

4. Vora B.V. Development of Dehydrogenation Catalysts and Processes. *Top. Catal*. 2012. V. 55. P.1297–1308. DOI:10.1007/s11244-012-9917-9.

5. Sattler J.H.B., Ruiz-Martinez J., Santillan-Jimenez E., Weckhuysen B.M. Catalytic Dehydrogenation of Light Alkanes on Metals and Metal Oxides. *Chem. Rev*. 2014. V. 114**,** №. 20. P. 10613–10653. URL : https*://*doi.org/10.1021/cr5002436|.

6. Nawaz Z. Light alkane dehydrogenation to light olefin technologies: A comprehensive review.*Rev. Chem. Eng.* 2015. V. 31, № 5. P. 413–436. URL : https*://*doi.*org/*10.1515/revce-2015-0012.

7. McFarland E. Unconventional Chemistry for Unconventional Natural Gas. *Science*. 2012. V. 338. P. 340–342. DOI: 10.1126/science.1226840.

8. Bhatt B.L., Kirner J.F., Rao P. and Schwartz W.A. Catalytic dehydrogenation reactor cycle. Pat. US 4581339, Publ. Apr. 08, 1986.

9. Bricker J.C., Jan D.-Y., Foresman J.M. Dehydrogenation catalyst composition. Pat. US 4914075, Publ. Apr. 03, 1990.

10. Brinkmeyer F.M., Savage K.B. and Bridges S.D. Dehydrogenation process control Pat US. 5243122, Publ. Sept. 07, 1993.

11. Iezzi R., Bartolini A., Buonomo F., Kotelnikov G. and Bespalov V. Process for obtaining light olefins by the dehydrogenation of the corresponding paraffins Pat. US 6362385, Publ. March 26, 2002.

12. Heineke D., Baier M., Demuth D. and Harth K. Method and catalyst for producing olefins, in particular propylenes, by dehydrogenation. Pat. US 6576804, Publ. June 10, 2003.

13. UOP’s PP plant using C3 Oleflex technology starts in China. February 03, 2015 (China). URL : http://www.fibre2fashion.com › News.

14. Ruettinger W. and Jacubinas R. Chromia alumina catalysts for alkane dehydrogenation. Pat. US 8895468, Publ. Novem. 25, 2014.

15. Sokolov S., Stoyanova M., Rodemerck U., Linke D., Kondratenko E.V. Comparative study of propane dehydrogenation over V-, Cr-, and Pt-based catalysts: Time on-stream behavior and origins of deactivation. *J. Catal*. 2012. V. 293. P. 67–75. URL : http://dx.doi.org/10.1016/ j.jcat.2012.06.005.

16. Sokolov S., Stoyanova M., Rodemerck U., Linke D., Kondratenko E.V. Effect of support on selectivity and on-stream stability of surface VO_x species in non-oxidative propane. *Catal. Sci. Technol*. 2014. V. 4. P. 1323–1332. URL : https://doi.org/10.1039/C3CY01083J.

17. Sokolov S., Bychkov V.Yu., Stoyanova M. Rodemerck U., Bentrup U., Linke D., Tyulenin Y.P., Korchak V.N., Kondratenko E.V. Effect of VOx Species and Support on Coke Formation and Catalyst Stability in Nonoxidative Propane Dehydrogenation. *ChemCatChem*.

2015. V. 7. P. 1691–1700. URL : https://doi.org/10.1002/cctc.201500151.

18. Зажигалов В.А., Коновалова Н.Д., Редькина А.В., Хоменко К.Н. Сравнительное исследование дегидрирования пропана на VO_x/MCM-41 и VO_x/Ti-MCM-41 с получением пропилена и водорода. *Укр. хім. журн*. 2013. V. 79. № 11. С. 63–72.

19. Cavani F., Ballarini N., Cericola A. Oxidative dehydrogenation of ethane and propane: How far from commercial implementation? Catal. Today. 2007. V. 127. P.113–131. URL : https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.05.009.

20. Liu G., Zhao Z.-J., Wu T., Zeng L., Gong J. Nature of the Active Sites of VO_x/Al_2O_3 Catalysts for Propane Dehydrogenation. *ACS Catal.* 2016.V. 6, № 8. P. 5207–5214. URL : http:// DOI: 10.1021/acscatal.6b00893.

21. Yamaguchi T. Application of ZrO_2 as a catalyst and a catalyst support. *Catal. Today*. 1994. V. 20. P. 199–217. URL : https://doi.org/10.1016/0920-5861(94)80003-0.

22. DeRossi S.. Ferraris,G., Fremoiotti S.,Garrone E..Ghiotti G., Campa M.C., IndovinaV. Propane Dehydrogenation on Chromia/Silica and Chromia/Alumina Catalysts. *J.Catal*. 1994, V. 148. P. 36–46. URL : https://doi.org/10.1006/jcat.1994.1183.

23. Cimino A., Cordischi D., DeRossi S., Ferraris G., Gazzoli D., Indovina V., Minelli G., Occhiuzzi M., Valigi M. Studies on chromia/zirconia catalysts I. Preparation and characterization of the system. *J.Catal*. 1991. V. 127. P. 744–760. URL : https://doi.org/10.1016/0021-9517(91)90196-B.

24. Zhao B.Y., Xu X.P., Ma H.R., Sun D.H., Gao J.M. Monolayer dispersion of oxides and salts on surface of ZrO_2 and its application in preparation of ZrO_2-supported catalysts with high surface areas. *Catal. Letters*. 1997. V. 45. P. 237–244. URL : https://doi.org/10.1023/A:1019048503124.

25. del Monte F., Larsen W., Mackenzie J.D.: J Stabilization of Tetragonal ZrO_2 in ZrO_2–SiO_2 Binary Oxides. *Am. Chem. Soc*. 2000. V. 83. P. 628–634. URL : https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01243.x.

26. Tanabe K., Yamaguchi T. Acid-base bifunctional catalysis by ZrOa and its mixed oxides. *Catal. Today*. 1994. V. 20. P. 185–197. URL : https://doi.org/10.1016/0920-5861(94)80002-2.

27. Fujdala K.L., Tilley T.D. Thermolytic molecular precursor routes to Cr/Si/Al/O and Cr/Si/Zr/O catalysts for the oxidative dehydrogenation and dehydrogenation of propane. *J. Catal*. 2003. V. 218. P. 123–134. URL : https://doi.org/10.1016/S0021-9517(03)00141-6.

28. Otroshchenko T., Bulavchenko O., Thanh H. V., Rabeah J., Bentrup U., Matvienko A., Rodemerck U., Paul B., Kraehnert R., Linke D., Kondratenko E.V. Controlling activity and selectivity of bare ZrO_2 in non-oxidative propane dehydrogenation. *Appl.Catal. A: Gen*. 2019. V. 585. P. 117189-117199. URL : https://doi.org/10.1016/j.apcata.2019.117189.

29. Jeon N., Choe H., Jrong B., Yun Y. Cu-promoted zirconia catalysts for non-oxidative propane dehydrogenation. *Appl.Catal. A: Gen*. 2019. V. 586. P. 117211117219. URL : https://doi.org/10.1016/j.apcata.2019.117211.

30. Редькина А.В., Коновалова Н.Д., Кравченко Н.В., Стрелко В.В. Дегидрирование пропана в пропилен на V_2O_5, нанесенном на микро-мезопористую систему оксидов ZrO_2-SiO_2-TiO_2.*Укр. хім. журн*. 2018. Т. 84, № 7. С. 43–59.

31. Яковлев И.І., Стрелко В.В., Кравченко М.В. Золь-гель спосіб одержання сферично гранульованого високо поруватого цирконій силікату. Опис до патенту на корисну модель. UA 105999 U, опубл. 10.04.2016, Бюл. № 7.

32. Редькіна А.В., Коновалова Н.Д., Стрелко В.В**.** Способ одержання каталізатора дегідрування пропану в пропілен. Опис до патенту на корисну модель UA 131758 U, опубл. 25.01.2019, бюл. № 2.

33. Koyano K.A., Tatsumi T. Synthesis of titanium-containing MCM-41. *Microporous Material*. 1997. V. 10: P. 259–271. URL : https://doi.org/10.1016/S0927-6513(97)00016-3.

34. Selvam P., Dapurkar S.E. The effect of vanadium sources on the synthesis and catalytic activity of VMCM-41. *J. Catal*. 2005. V. 229. P. 64–71. URL : http*://dx*.doi.*org/*10.1016/j.jcat.2004.10.005.

35. Raju V., Jaenicke S., Chuah G.-K. Effect of hydrothermal treatment and silica on thermal stabilityë and oxygen storage capacity of ceria–zirconia. *Appl. Catal. B*. 2009. V. 91. P. 92–100. URL : https*://*doi.*org/*10.1016/j.apcatb.2009.05.010.

36. He X., Zhang H., Li Y., Hong Ch., Zhao J. Preparation and Structural Characterization of SiO2-ZrO_2 Aerogels. *Key Eng. aterials*. 2007. V. 336–338. P. 2282–2285. URL : https*://*doi.*org/*10.4028/ www.scientific.net/KEM.336-338.2282.

37. Bosman, H.J.M., Kruissink, E.C., Van der Spoel, J., Van den Brink, F. Characterization of the acid strength of ZrO_2-SiO_2 mixed oxides. *J. Catal*. 1994, V. 148. P. 660-672. URL : https*://*doi.*org/*10.1006/jcat.1994.1253.

38. Li M., Feng Z., Xiong G. Ying P., Xin Q., and Li C. Phase Transformation in the Surface Region of Zirconia Detected by UV Raman Spectroscopy. *J. Phys. Chem. B*. 2001. V.105. P. 8107-8111. URL : https://doi.org/10.1021/jp010526l.

39. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pierotti R.A., Rouquerol J. and Siemieniewska T. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*. 1985. V. 57, No. 4. P. 603–619. URL : https://doi.*org*/10.1351/pac198254112201.

40. Халдеева О.А., Трухан Н.Н. Мезопористые титан-силикаты как катализаторы процессов жидкофазного селективного окисления органических соединений. *Успехи химии*. 2005. Т. 75, № 5. С. 460–483.

41. Редькина А.В., Коновалова Н.Д., Хоменко К.Н. Дегидрирование пропана на V_xO_y/H-Ti-MCM-41. *Химия, физика и технология поверхности*. 2014. Т. 5, № 2. С. 174–189.

42. Sahebdelfar S., Tahriri Zangeneh F. Dehydrogenation of Propane to Propylene Over Pt-Sn/Al_2O_3 Catalysts: The influence of operating conditions on product selectivity. *Iranian J. Chem. Eng*. 2010. V. 7, №. 2. P. 51–57.

43. Синицин М.В. Влияние «сланцевой революции» в США на американскую и мировую экономику. С. 22-26 в кн. Перестройка мировых энергетических рынков: Возможности и вызовы для России. Под ред С.В. Жукова. Москва : ИМЭМОРАН, 2015, 152 с.

44. UOP's PP plant using C3 Oleflex technology starts in China. February 03, 2015 (China). URL : http://www.fibre2fashion.com›.

45. Honeywell UOP to Power Europe's Largest Production Unit for Plastics Building Block. June 11, 2015. URL : http://www.uop.com.

Information about authors:
Redkina A. V.,
Candidate of Chemical Sciences,
Senior Researcher of the Institute of Sorption
and Problems of Endoecology
National Academy of Sciences of Ukraine
13, Gen. Naumova St., Kyiv, 03164, Ukraine

Konovalova N. D.,
Candidate of Chemical Sciences,
Senior Researcher of the Institute of Sorption
and Problems of Endoecology
National Academy of Sciences of Ukraine
13, Gen. Naumova St., Kyiv, 03164, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.20

УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Савенко В. И., Полосенко А. В.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях эффективное развитие систем управления – одно из важнейших направлений повышения экономического потенциала строительных организаций. Опыт показывает, что организации, возглавляемые высококвалифицированными, опытными руководителями, в совершенстве владеющими современными знаниями и техникой, как правило, успешные.

В системе управления реализуется процесс взаимодействия объекта управления и управляющей подсистемы. Управляемость системы – одно из основных свойств, характеризующих состояние системы и ее организованность.

Вырабатываемые управляющей подсистемой управляющие воздействия всегда направлены на уменьшение разнообразия, возможных состояний управляемого объекта, подсистемы. Идеальный вариант характеризуется сведением всех возможных состояний к одному, заранее намеченному. Для этого сознательно создаются необходимые условия и интеллектуальные инструменты, новые материалы и технологии.

Анализ результатов исследований и публикаций по проблеме оптимизации работы управляющей системы позволил выявить наличие различных подходов в решении поставленных задач.

Так, как показал У.Р. Эшби, для того, чтобы управляющая система могла эффективно справляться с этой задачей, она должна сама обладать необходимым разнообразием, так как «только разнообразие может уничтожить разнообразие»[1]. Наиболее совершенной формой саморегулирования с использованием обратной связи является самоорганизация (гомеостазис). Обеспечивается так называемая

[1] Эшби У.Р. Введение в кибернетику. Москва : ИЛ, 1959. С. 120–125.

сверхстабильность, т.е. способность системы возвращаться к состоянию равновесия после воздействия различных случайных возмущений[2]. Самоорганизующаяся система в принципе является многоконтурной. В ее основе лежит некоторая исходная управляющая система, которая обменивается информацией с объектом управления (первый контур). В результате такого обмена и обеспечения необходимой реакции на «нормальные» внешние воздействия достигается равновесное состояние системы.

Помимо первого контура, в самоорганизующейся системе должен функционировать по крайней мере еще один контур (второго порядка). Это необходимо, чтобы встроенная в него система управления контролировала и прогнозировала эффект, вызываемый деятельностью первого контура.

В том случае, если результаты контроля и прогноза оцениваются системой второго уровня как неудовлетворительные (при отличных от «нормальных» внешних воздействиях), она вносит изменения в правила функционирования первой системы. В принципе, самоорганизующая система обычно имеет больше двух уровней управления[3]. Гармонизация управляющей и управляемых систем – ключ к повышению эффективности функционирования организации в целом.

Оптимизация использования ресурсов путем эффективного управления производственными процессами и формирования эффективных организационных структур. Определение факторов, влияющих на состояние функционирования саморегулирующейся системы, в которую включены элементы обратной связи. Обеспечения условий функционирования факторов сверхстабильности, т.е. способности системы возвращаться к состоянию равновесия после воздействия различных случайных возмущений.

В экономических системах переходу к эффективным формам саморегулирования и самоорганизации существенно способствует согласованность производственных целей разных уровней управления и обеспечение эффективного взаимодействия людей, имеющих подчас различные интересы, в направлении достижения этих целей.

---

[2] Бир С. Кибернетика в управлении производством. Москва : Физматгиз, 1965. С. 271.

[3] Бусленко Н.П. и др. Лекции по теории сложных систем. Москва : «Советское радио», 1973. С. 230–236.

В строительной системе информация по каналам прямой связи передается в виде команд (управляющих воздействий) руководства, по каналам обратной связи – в виде сведений о постоянно меняющейся обстановке на стройке. Кроме того, поступают сведения о возмущающих воздействиях извне. Таким образом, с наиболее общей точки зрения процесс получения информации – процесс снятия неопределенности в результате того, что из некоторой совокупности возможных в данной конкретной ситуации явлений выделяется явление, фактически имевшее место. Основная задача автоматизированной системы управления, сформулированная В.М. Глушковым, состоит в том, чтобы обеспечить оптимальное функционирование объекта управления (производственной организации, объединения, отрасли и т.п.) как единого целого за счет правильного выбора целей и путей их достижения, наилучшего распределения заданий между отдельными частями, из которых состоит объект, и обеспечения их четкого взаимодействия.

1. Задачи, виды и процессы управления

Известны четыре этапа, характерные для любого процесса управления: появление цели; оценка ситуации; принятие решения и исполнение принятого решения. При управлении сложными процессами оценка ситуации производится на основе собранной и соответствующим образом обработанной информации, выделяются четыре этапа процесса управления:

1) сбор и обработка информации с целью оценки сложившейся ситуации;

2) принятие решения о наиболее целесообразных действиях;

3) исполнение принятого решения;

4) контроль исполнения решения;

Различные виды задач управления отличаются друг от друга способом и последовательностью выполнения этих операций.

Имеется много задач, в которых механизмы сбора информации и исполнения принятого решения отработаны настолько четко, что при осуществлении процесса управления не возникает никаких проблем. В таких задачах все рассмотрение процесса управления сводится, по существу, к рассмотрению только второго этапа. Такие и подобные задачи получили название одноэтапных, или одношаговых задач принятия решения.

Однако типичным для задач управления является случай. Когда имеющаяся информация бывает или недостаточна для точной оценки ситуации, или искажена посторонними факторами.

1.1. Управление и исследование операций

Существует еще один специфический класс задач управления, которые связаны с деятельностью крупных промышленных предприятий или больших строек и могут быть названы задачами организационно-управленческого характера. Каждое отдельное специализированное подразделение крупной организации выполняет определенную часть общей работы, руководствуясь общими целями предприятия или организации. Однако у каждого специализированного подразделения возникают и свои собственные цели. Все эти цели не всегда согласуются, а иногда приходят в противоречие друг с другом. В результате возникает задача организационно-управленческого типа – выработки такой стратегии в отношении запасов, которая была бы наиболее благоприятна для всего предприятия в целом.

Специфическая особенность задач организационно-управленческого типа состоит в том, что последствия того или иного способа их решения могут существенно отразиться на работе всего предприятия. Поэтому принятие окончательного решения всегда относится к компетенции ответственного лица, администратора, наделенного соответствующими правами, и выходит за рамки исследования операций. Исследование операций преследует лишь цель дать в руки администратору обоснованные рекомендации по принятию решения.

1.2. Управление предприятием в условиях неопределенности. Неопределенность ее виды

Деятельность хозяйственных субъектов осуществляется в условиях рынка, который характеризуется прежде всего экономической свободой действий производителя. За экономическую свободу необходимо платить, ведь свободе одного предприятия сопутствует свобода и других предприятий, которые могут покупать или не покупать его продукцию, предлагать за нее свои цены, продавать встречную продукцию по определенным ценам, диктовать свои условия сделок, естественно, при этом партнеры стремятся прежде всего к собственной выгоде. Относительность такого понятия, как выгода, сводится к тому, что

выгода для одних может обернуться убытком для других. Это положение усиливается еще и тем, что предприятия, производящие однородную продукцию, вообще стремятся вытеснить своего конкурента с рынка.

Следовательно, независимо от желания, начиная свою деятельность, а значит, вступая в рынок, любому предприятию придется иметь дело с неопределенностью и, как следствие этого, испытывать на себе на протяжении всей деятельности влияние тех видов рисков, которые присущи данной экономике и данному направлению деятельности.

Специфической характеристикой неопределенности является то, что субъекты предпринимательской деятельности должны учитывать влияние неопределенности развития не только собственного (внутреннего) рынка, но и внешнего, что является следствием расширения мировых хозяйственных связей и процесса интеграции экономик различных стран.

Условия неопределенности, имеющие место в предпринимательской деятельности, являются предметом исследования и объектом постоянного наблюдения экономистов самых различных профилей, а также специалистов других областей (юристов, социологов, политологов и т.п.). Такой комплексный подход к изучению данного явления (неопределенности в бизнесе) связан с тем, что хозяйственные субъекты в процессе своего функционирования испытывают зависимость от целого ряда условий. Данные условия зависимости можно классифицировать по месту их возникновения на такие виды:

– социально-политические;
– административно-законодательные;
– производственные;
– коммерческие;
– финансовые.

Научные представления о неопределенности, а как следствие этого, и о рисках, формировались поэтапно.

В бывшем Советском Союзе в 20-е годы такое понятие, как риск, было закреплено в некоторых законодательных актах относительно производственной и рационализаторской деятельности. Однако уже в середине 30-х годов оно характеризуется как «буржуазное». Становление и последующее функционирование экономики командно-административного типа, одним из важных условий которой являлась всеобщая плановость, явилось следствием того,

что такое понятие, как предпринимательский риск, полностью прекратил свое существование, как явно враждебное плановой экономике.

Разумеется, это имело смысл. Однако полностью с этим нельзя согласиться по нескольким причинам. В первую очередь, потому что и в условиях командной экономики существовала неопределенность, связанная, по крайней мере, с тем, что существовали экспортно-импортные операции, местные товаропроизводители продавали свою продукцию и покупали необходимые товары на внешнем рынке, соприкасаясь таким образом со всеми видами рисков, которые присущи любому субъекту рыночной экономики.

Во-вторых, кроме внешнеэкономических рисков, всегда был риск невыполнения государственных планов, устанавливаемых в приказном порядке. Характерным для того периода времени было то, что последствия этой неопределенности не отражались напрямую на товаропроизводителях, а она целиком и полностью ложилась на плечи государства. Другими словами, существовала такая ситуация, когда при принятии экономических решений субъектами хозяйственной деятельности последние не несли ответственности за последствия решений, а перекладывали ее на общество в целом. Таким образом, отсутствие заинтересованности в результатах экономических решений являлось причиной отсутствия риска как такового.

Ориентация Украины на построение экономики рыночного типа означает появление самых различных видов неопределенности для всех субъектов ее хозяйственной деятельности.

Существует несколько возможных подходов к классификации неопределенности, из которых наиболее широко применим подход ее характеристики с точки зрения вероятности наступления событий.

Причины возникновения неопределенности можно объединить в несколько основных групп:

– недетерминированность процессов, проходящих в обществе в целом и в экономической жизни в частности. При этом недетерминированность является следствием отсутствия возможности полного их предсказания и прогнозирования;

– отсутствие полной информации при планировании поведения рыночного субъекта, либо ее субъективный анализ;

– влияние субъективных факторов на результаты проводимых анализов (уровень квалификации работников, проводящих анализ; величина временного пространства анализируемого периода и т.п.).

1.3. Особенности управления фирмой в условиях неопределенности

В исследованиях по проблемам, связанным с изучением рисков, возникло целое направление работ под общим названием «риск-менеджмент», либо, как его еще называют, «управление риском». Его особенностью является комплексность проведения исследований, которая включает в себя различные аспекты: научные, технические, организационно-управленческие, социально-экономические и т.п. При этом широко применяются методы системного подхода и оптимизации процесса принятия решений в условиях неопределенности с целью разработки методологии управления риском.

В условиях конкурентной борьбы, связанной с постоянно проходящими на рынке изменениями, вопросы управления предприятием претерпевают некоторые изменения, которые проходят по следующим основным направлениям:

– появляется потребность в наличии большого количества аналитического материала, необходимого для анализа и принятия управленческих и маркетинговых решений;

– мониторинговые исследования рынка, сопоставление существующей маркетинговой стратегии и стратегии менеджмента с потребностями рынка;

– появляется необходимость более широкого использования сценарийных подходов при планировании деятельности предприятия (пессимистических, оптимистических и других видов прогнозов с проведением анализа вероятности выпадения событий) и максимально возможного учета всех видов неопределенности.

Факторы неопределенности, которые влияют на любой рыночный субъект, также присутствуют и непосредственно в процессе управления им.

По месту возникновения неопределенность в управлении предприятием (фирмой) может быть следствием:

– неопределенности в определении планового периода и, в частности, периода, на который разрабатывается стратегия развития предприятия;

– неопределенности при формировании целей предприятия и в выборе приоритетов в поставленных целях, что может быть обусловлено наличием ряда альтернативных целей;

– ошибок в оценках настоящего положения дел внутри самого предприятия и его места на рынке, которые, в свою очередь, могут

быть следствием целого ряда причин объективного и субъективного характера;

– недостаточно полной или ошибочной информации о перспективах развития данного предприятия и рынка в целом, а также решений, принятых на ее основании;

– возможных сбоев при разработке стратегии развития предприятия, а также во время ее реализации;

– неопределенности при контроле и оценке результатов деятельности предприятия.

Стратегия развития фирмы в условиях рыночной экономики должна формироваться с учетом этих видов неопределенности на каждом из этапов: на этапе определения периода разрабатываемой стратегии, на этапе формирования целей, при разработке путей реализации выбранной стратегии и формировании направлений деятельности, при анализе компетенций собственного предприятия, а также на этапе контроля за выполнением стратегии и оценки ее реализации. Предложенная методика приводится на рис. 1.

Процесс управления фирмой в условиях неопределенности подвержен влиянию внутренних и внешних факторов.

Внутренние факторы – это те факторы, которые обусловлены неопределенностью, имеющей место на предприятии. Внешние факторы, в отличие от внутренних, являются следствием наличия неопределенности за пределами данного предприятия.

Рис. 1. Стратегическое управление фирмой в условиях неопределенности

Неопределенность внешнего происхождения является функцией от достоверности внешней информации и, как следствие этого, функцией от достоверности составляемых прогнозов. Чем выше степень неопределенности, тем сложнее принимать управленческое решение.

Некоторые ученые предлагают характеризовать внешнюю среду с точки зрения нестабильности по таким признакам:

– степень обыденности действия (события). По этому признаку события делятся на обычные, т.е. такие, которые случаются довольно часто; неожиданные, но такие, которые имели место в

прошлом; абсолютно неожиданные, и новые, т.е. такие, которые практически не имели аналогов в прошлые периоды;

– темп изменения действия. Под этой характеристикой понимается зависимость между скоростью протекания события и реакцией предприятия (фирмы) на это действие. По этому признаку события классифицируются на: такие, которые протекают медленнее, чем предприятие реагирует на них; такие, скорость протекания которых совпадает со скоростью реакции предприятия; такие, скорость протекания которых превышает скорость реакции на них со стороны предприятия.

Данная характеристика является достаточно целесообразной. Однако вместе с тем она может быть усовершенствована введением характеристики степени прогнозированности дальнейших событий, происходящих во внешней среде, по предложенному ранее механизму оценки степени прогнозированности событий с более детальной разработкой частично прогнозируемых действий.

Наличие источников внутреннего происхождения неопределенности обусловлено тем, что предприятие, являясь сложной, динамичной и открытой системой, имеет в своем составе неоднородные элементы с разнохарактерными связями и особенностями в иерархической структуре.

Динамичность экономической системы является следствием того, что она непрерывно развивается как самостоятельно, так и в результате развития внешнего окружения.

Открытость экономической системы является следствием того, что она существует только лишь как один из элементов более сложной системы (экономики региона, отрасли, страны в целом).

Влияние субъекта управления на управляемый им объект может происходить только лишь при условии обмена информацией между ними. Таким образом, неопределенность в управлении предприятием, с точки зрения качества информации, может возникнуть на этапе: 1) сбора и анализа информации; 2) принятия управленческого решения на основании собранной и проанализированной информации.

Важной функцией управления является планирование. Планирование, как и весь процесс управления, имеет также вероятностный характер. На практике это означает, что неопределенность, существующая при составлении тактических планов, еще более возрастает при составлении стратегических. Тактическое планирование, направленное на определение средств

для достижения поставленных в стратегическом плане целей, будет иметь тем меньшую неопределенность, чем меньший плановый период оно охватывает и, соответственно, большую неопределенность, чем длиннее плановая перспектива. Таким образом, существует прямо пропорциональная зависимость между сроком, на который разрабатывается план, и степенью его неопределенности. Стремление фирмы охватить своими планами как можно более длительный временной период вступает в явное противоречие, с точки зрения теории рисков, со степенью достоверности планов и возможностью их реализации. Данное противоречие может быть разрешено путем разумной минимизации плановой перспективы и использования вероятностных подходов к оценке конкретных экономических показателей. Никакой план не является окончательным, он может быть пересмотрен при сложившихся условиях. Другими словами, реализованная неопределенность может и должна вызвать в нем адекватные изменения.

2. Оптимизация процесса управления

2.1. Критерий качества управления

Задачу управления рассматривают как математическую задачу. Однако, в отличие от многих других математических задач, она имеет ту особенность, что допускает не одно решение, а множество различных решений. Это связано с тем, что в задачах управления имеется, как правило, много способов организации какого-либо процесса, которые приводят к достижению поставленной цели. Задачу управления можно было бы ставить как задачу нахождения хотя бы одного из возможных способов достижения поставленной цели. Однако такая постановка вопроса обычно бывает недостаточной.

Если имеется множество решений какой-либо задачи, то возникает добавочная задача – выбрать из этого множества решений такое, которое с какой-либо точки зрения является наилучшим.

Математическое выражение, дающее количественную оценку степени выполнения наложенных на способ управления требований, называется критерием качества управления. Наиболее предпочтительным или оптимальным способом управления будет такой, при котором критерий качества управления достигает необходимого значения.

2.2. Ограничения, накладываемые на процесс управления

Задачу нахождения оптимального управления или управления вообще следует считать несуществующей, т.е. не вызывающей никаких проблем, если на характер движения системы не наложено никаких ограничений.

Графическая модель внутренней и внешней среды производственной системы (к примеру, строительной организации) и их взаимодействия в общем виде представлена на рис. 2. Показано также взаимное влияние элементов системы и цели, стоящей перед организацией.

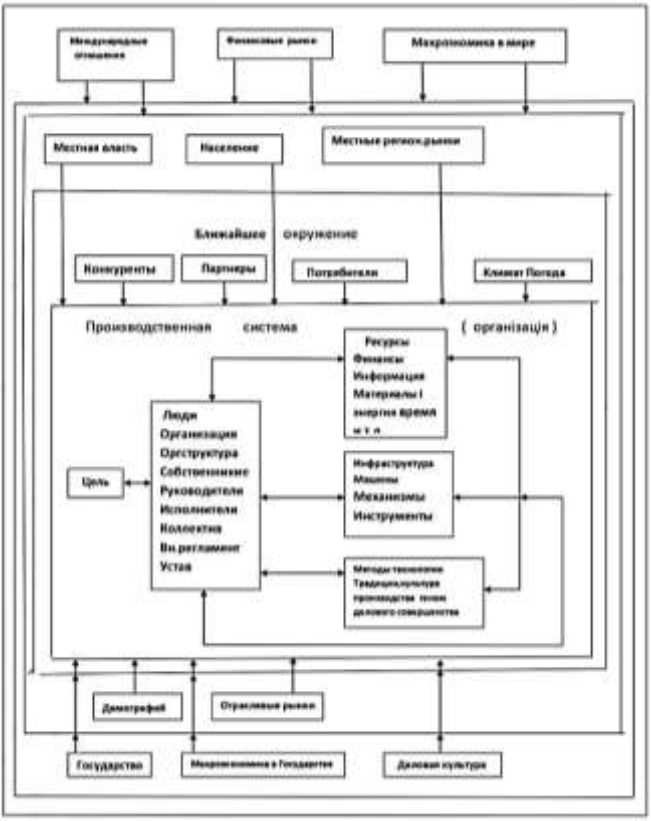


Рис. 2. Внутренняя и внешняя среда организации, связи и взаимодействия

2.3. Постановка задачи оптимального управления

Задачу управления можно считать сформулированной математически, если: сформулирована цель управления, выраженная через критерий качества управления; определены ограничения первого вида, представляющие собой систему дифференциальных или разностных уравнений, ограничивающих возможные способы движения системы; определены ограничения второго вида, представляющие собой систему алгебраических уравнений или неравенств, выражающих ограниченность ресурсов или иных величин, используемых при управлении.

Способ управления, который удовлетворяет всем поставленным ограничениям и соответствует всем критериям качества управления, можно назвать оптимальным управлением.

3. Исследование влияния соционических факторов на параметры технологических процессов производства работ в экстремальных условиях

На производительность труда и его качество, кроме объективных факторов (погодные условия, солнечная радиация, применение новой техники и материалов, способов производства работ и т.д.), оказывают влияние и субъективные факторы, присущие персоналу. Производительность труда отдельно взятого исполнителя зависит от его квалификации, физических данных, выносливости, ловкости, добросовестности.

Производительность работы звена (экипажа) будет определяться, кроме вышеперечисленных качеств, еще и организованностью, слаженностью совместных действий в ограниченном пространстве, в условиях повышенной опасности на протяжении всего рабочего времени, т.е. в экстремальных условиях.

Большое значение при этом имеет и мотивация труда, моральная и материальная заинтересованность. Однако в любом случае при работе двух человек в ограниченном пространстве (люльке) на высоте в экстремальных условиях необходимо учитывать их индивидуальные особенности, совместимость типов характеров.

Отличие в типе личности – это есть не что иное, как отличие в обмене информационными (биоэнергетическими) сигналами с другими типами личности или типами информационного метаболизма.

Известно, что психика человека окружающий мир дифференцирует на определенные составные части или аспекты. И каждый тип

личности о каком-то из этих аспектов получает очень дифференцированную информацию, а информацию о других аспектах воспринимает недифференцированную в сжатом виде. Поэтому разные типы личности, побывав в одной и той же ситуации, помнят и рассказывают совсем другое и другими словами.

В основе психологического дискомфорта человека находится нарушение его информационного метаболизма. Этим нарушением является недополучение нужных сигналов, раздражителей от человека с неподходящими типами психики и перегрузка ненужными, утомляющими, раздражающими сигналами от людей, контакт с которыми затруднен из-за своего типа информационного метаболизма, они свои мысли высказывают малопонятным и неприемлемым способом.

Люди с неприемлемым для кого-то типом информационного метаболизма очень травмируют какими-то замечаниями, которые не дают ни информации, ни покоя.

Всего существуют 16 типов информационного метаболизма. Каждый человек принадлежит к одному из 16 типов. С помощью методов соционики идентифицируется тип личности. В эксперименте использовалась методика и тесты, разработанные А. Аугустинавичуте[4].

В совместной работе люди действуют целенаправленно, эти действия более результативны, если они имеют психическую опору в людях с другим психическими устройством. Это один из секретов простой кооперации и достижения синергизма.

В общении людей и их взаимопонимании важнейшими моментами являются уровень интеллекта и культуры. Но когда речь идет о психическом дополнении психологической совместимости, самое главное – тип информационного метаболизма.

Он определяется порядком селекции и обработки психикой человека (биосистемы) получаемой информации. Этот порядок определяет много психических свойств человека: склонности, способности, интересы, формы активности, целенаправленность и мотивация поведения, взаимоотношения с другими людьми, вкусы и т.д.

В соционике существуют способы и методики идентификации информационного метаболизма личности, в частности это можно

---

[4] Аугустинавичюте А. Теория признаков Рейнина. Соционика, ментология и психология личности. 1998. № № 1-6.

осуществить путем наблюдения с учетом характерных черт и признаков для каждого типа, а также используя специальные тесты.

Основываясь на основных законах соционики, можно составить диады совместимых типов характеров[5].

Такой подбор партнеров для длительной работы в экстремальных условиях и формирование экипажей (звеньев) фасадчиков позволяет избежать конфликтных ситуаций наряду с материальной заинтересованностью, квалификацией, добросовестностью и ответственным отношением к своим обязанностям, повысить производительность труда и качество выполняемых работ.

В проводившемся эксперименте на объектах ДСК-3 с рабочими одинаковой квалификации (4 разряд), подобранными с учетом и без учета психологической совместимости, с одинаковой (повышенной в 2 раза, по сравнению с нормативной) материальной заинтересованностью, при благоприятных погодных условиях путем хронометража и сравнения результатов работы по процессам с нормативными был определен поправочный коэффициент $К_{инт}$ – коэффициент интенсивности труда, учитывающий результаты работы, работая совместимости членов экипажей.

$$К_{инт.} = \frac{Т_{н.}}{Т_{эксп}} \quad (1)$$

где $Т_{эксп}$ – продолжительность процесса в эксперименте (час); $Т_{н}$ – нормативня продолжительность процесса (час).

Таблица 1

Коэффициенты интенсивности труда по процессам

№ п/п	Наименование	Продолжительность процесса Т(час)		
		Эксперимент.	Нормативная	Кинт
1.	Перестановка самоподъем. люльки	2,5	3,3	1,326
2.	Укладка ПРП	2	6,7	3,35
3.	Заделка стыков раствором	3	8,92	2,97
4.	Праймирование поверхности стыка	1	3,56	3,5
5.	Нанесение мастики	2	4,74	2,372
6.	Устройство солнцезащиты	0,83	2,52	3,04

[5] А. Аугустинавичуте «Дуальна природа людини», «Соціотех». Киев, 1992. 94 с.

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют, что подбор экипажей самоподъемных люлек для работы в условиях с повышенной опасностью с учетом типов информационного метаболизма, личности исполнителей влияют на производительность труда и качество работ, поэтому должны учитываться в технологических расчетах в виде поправочного коэффициента $К_{инт}$, определяемого эмпирическим путем.

Влияние соционических факторов на формирование эффективных оргструктур, их управляемость и производительную работу в разных отраслях со сложными условиями деятельности (геологи, военные, строители, линейные работники, горняки и т.д.) доказано также в натурных исследованиях группой киевских ученых-соционников, проведших большую и очень ценную для науки и практики работу в экстремальных условиях Крайнего Севера[6].

ВЫВОДЫ

1. Рациональное потребление и расходование всех видов ресурсов (в том числе трудовых, финансовых, времени) возможно лишь при условии четкого и максимально точного планирования, организации и управления производством с учетом внутренней и внешней среды организации, а также методов управления.

2. Исходные данные для проектирования и организации производственных процессов должны максимально соответствовать реальным условиям, быть достоверными.

3. Управление должно быть гибким и устойчивым даже в условиях возможных неопределенностей. Для этого должны максимально использоваться современные компьютерные средства и информационные технологии во главе с высокоинтеллектуальным и компетентным высокоморальным человеком-руководителем.

4. Поскольку имеет место влияние соционических факторов на формирование эффективных оргструктур, их управляемость и производительную работу, необходимо учитывать тип информационного метаболизма личности при формировании социальных производственных структур. Особенно для работы в экстремальных условиях и условиях неопределенности, когда эти факторы приобретают решающее значение.

---

[6] Букалов А.В, Карпенко О.Б, Чикирисова Г.В. О распределении соционических типов в различных производственных коллективах. *Соционика,ментология и психология личности*. 2000. № 1.

АННОТАЦИЯ

В статье исследованы проблематичные аспекты нахождения оптимального управления. В общем случае имеется два вида ограничений, наложенных на выбор способа управления. Ограничениями первого вида являются сами законы природы, в соответствии с которыми происходит функционирование управляемой системы. Графическая модель внутренней и внешней среды производственной системы (к примеру, строительной организации) и их взаимодействие в общем виде представлены в статье. Показано также взаимное влияние элементов системы и цели, стоящей перед организацией. Решающая роль принадлежит персоналу, принимающему и осуществляющему решения по преодолению возникающих перед организацией проблем. Несмотря на преимущества компьютерных систем в быстродействии и работе с большими массивами информации, человек, одаренный интеллектом и интуицией, лучше справляется с работой в условиях неопределенности, тем более с помощью машин. При этом важно учитывать соционические факторы для формирования эффективных организационных структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савенко В.І., Пальчик С.П., Клюєва В.В. Победа С.С. Ентропія як прояв системної та діалектичної сутності будівельної організації комбінатного типу. *Вип. № 36. КНУБА*. Київ, 2018. С. 142–147. URL : http://urss.knuba.edu.UaCopernicusGoogle.

2. Доценко С.І., Савенко В.І. Теоретичне обґрунтування ізоморфізму організаційної структури підприємства. *Наук.-техн.журнал Енергетика та комл Інтегровані технолог АПК.* № 1(6) Харків. 2017. С. 43–47.

3. Савенко В.І. Генетичний підхід до ділової досконалості та ізоморфізм структури будівельної організації. Тексти тез доповідей В.І. Савенко, С.І. Доценко, В.В. Клюєва, С.П. Пальчик. *8 Міжнародна конф.тези КЗЯТПС ЧНТУ*. Чернігів, 2018. С. 101–102.

4. Савенко В.І. Оптимальні методи управління будівельною організацією комбінатного типу Текст / В.І. Савенко, С.І. Доценко, В.В. Клюєва, М.О. Терещук. *Управління розвитком складних систем. № 35, наук. вид. КНУБА.* Київ, 2018. С. 147–154. URL : http://urss.knuba.edu. UaCopernicusGoogle.

5. Савенко В.І. Організаційні виробничі системи в світлі загальної організаційної науки та сучасного кадрового менеджменту. *УРСС.* 2018. № 34. С. 161–169. URL : http://urss.knuba.edu.UaCopernicusGoogle.

6. Савенко В.І. Інтелектуальні інформаційні інструменти розвитку виробничої системи енергетичного менеджменту та підприємства в цілому. *УРСС. Вип. № 37 КНУБА*. Київ, 2019. С. 195–204. URL : http://urss.knuba.edu. UaCopernicusGoogle.

7. Аугустинавичуте А. Дуальна природа людини. Київ, 1992. 95 с.

8. Бухалов О.В., Ермак В.Д., Качанець І.В. Заочная школа соционики. Книга 1. / Соціотех. Украинский институт соционики. К.1001. 95 с.

9. Аугустинавичюте А. Теория признаков Рейнина. *Соционика, ментология и психология личности.* 1998. № 1–6.

10. Букалов А.В., Карпенко О.Б., Чикирисова Г.В. О распределении соционических типов в различных производственных коллективах. *Соционика, ментология и психология личности*. 2000. № 1.

11. Карпенко О.Б., Букалов А.В., Чикирисова Г.В. Признаки Рейнина: гендерные различия и социальные ожидания. *Соционика, ментология и психология личности*. 2000. № 5.

12. Рейнин Г.Р. Теоретический анализ типологических описаний личности в психологии. *Соционика, ментология и психология личности*. 1999. № 4–6.

13. Анохин П.К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. Москва : Медицина, 1975. 448 с.

14. Велихов, Е.П. Интеллектуальные процессы и их моделирование. Москва : Наука, 1987. 396 с.

15. Доценко С.И. К вопросу о кризисе системной методологии и пути его преодоления. *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. № 4/1(18). С. 12–17. doi: 10.15587/2312-8372.2014.26230.

Information about authors:

Savenko V. I.,
Candidate of Technical Sciences (PhD), Doctor of Technical Sciences (RF), Doctor of Civil Engineering, Professor,
Kyiv National University of Construction and Architecture
31, Povitroflotskyi ave., Kyiv, 03037, Ukraine

Polosenko A. V.,
Graduate Student
Kyiv National University of Construction and Architecture
31, Povitroflotskyi ave., Kyiv, 03037, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.21

IMPULSE MILK HOMOGENISATION

Samoichuk K. O., Palianychka N. O.

INTRODUCTION

The process of producing fine dispersed emulsions via homogenization is widespread in many industries[1]. Homogenization has been most widely used in the dairy industry, where it is one of the most important technological processes. Homogenization of fat particles to microscopic sizes increases the nutritional value of milk, improves its sensory and taste properties, increases stability during storage and transportation, etc.[2]. The quality of products using homogenized milk is much higher. That is why homogenization is the normative process in most technological schemes for the production of drinking sterilized and pasteurized milk, fermented milk products, ice cream, canned milk, and cheese production. With the development of technologies, homogeneous components are being applied, and higher requirements for the dispersion of the final product are being made.

The main technical problem of obtaining fine emulsions is the limited capacity of homogenizers. Therefore, designing devices and methods for producing finely dispersed emulsions with the ability to vary dispersion and high productivity is of high relevance.

Valve homogenizers are mainly used for homogenization of milk and dairy products. However, analysis of valve homogenizers design showed that they have significant drawbacks: big overall dimensions and weight, high metal consumption, high energy consumption, rapid wear of the valve surfaces and a fairly high cost of equipment. It should be noted that other existing types of homogenizers either do not allow to achieve such degree of dispersion of the fat phase, or have sufficiently large energy costs for the process. Thus, the issue of improving the existing and

[1] Wilbey R.A. Homogenization of milk. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2002. P. 1346–1349. doi: 10.1016/ b0-12-227235-8/00202-9.

[2] Michalski, M.-C. Januel C. Does homogenization affect the human health properties of cow's milk? *Trends in Food Science & Technology*. 2006. Vol. 17, Issue 8. P. 423–437. doi: 10.1016/j.tifs.2006.02.004.

creating new devices for homogenization of the fat emulsion remains quite relevant today.

Impulse homogenization can be considered a promising way of dispersing a fat emulsion. A laboratory unit for studying the process of impulse homogenizatio has been developed on the basis of the Department of Equipment of Processing and Food Production named after Professor F. Yalpachyk of Dmytro Motorny Tavria State Agrotechnological University.

1. Theoretical researches of the impulse homogenization process

The main purpose of the study is to reduce energy consumption of the process of dispersion of milk emulsion by using a device for impulse homogenization.

Installation for impulse homogenization consists of a working chamber of the impulse homogenizer 4 (fig. 1) with the percussion piston 5, which are driven into oscillatory motion with the spindle 9 by the actuator 8.

The main percussion piston is tightly fixed on the spindle and the additional piston is connected to the main by a spring. In order control the oscillation frequency of the percussion piston, the direct current motor is used. An adjustable crank is used to change the oscillation amplitude of the percussion piston[3]. At the bottom of the chamber there is a valve for removal of milk after homogenization 6 into the tank 7.

Milk is fed to the working chamber of the homogenizer from the receiving tank 1 by the pump 3. The valve 2 is used to supply the milk under the required pressure to the pump and the working chamber of the homogenizer.

The impulse actuator is used to create oscillating motions of the spindle and the pistons strikers in the working chamber of the homogenizer. This impulse actuator is an adjustable crank mechanism that is coupled to a V-belt with the direct current motor.

[3] Гвоздєв О.В, Паляничка Н.О., Яворницький В.М. Пошук конструктивного рішення імпульсного гомогенізатора молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ. Вип. 8, Т. 7. 2008. С. 28–32.

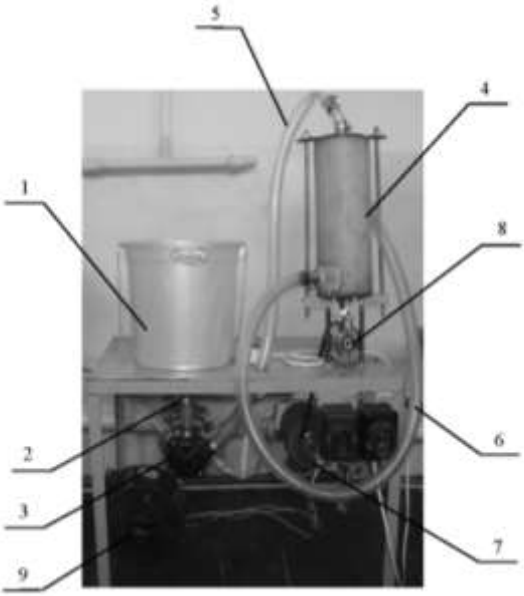


Fig. 1. General type of the device for impulse homogenization of milk: 1 – technological tank; 2 – by-pass valve; 3 – the pump; 4 – working chamber of the homogenizer; 5, 6 – tubes for supplying source and draining homogenized milk; 7 – direct current motor; 8 – impulse drive; 9 – laboratory transformer

As a result of the analysis of forces capable of destroying the fat globule, it was determined that the main force is inertia, which in turn contributes to the appearence of a gradient of the flow rate of milk[4]. In order to intensify the inertia force, the design of a impulse homogenizer with a main and additional percussion piston with through holes, which are connected to each other by a spring, has been suggested[5].

It has been determined that one of the important factors affecting the degree of dispersion is the geometric shape of the openings of the

[4] Паляничка Н.О., Гвоздєв О.В. Аналіз існуючих гіпотез руйнування жирових кульок. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ. Вип. 10, Т. 3. 2010. С. 48–54.

[5] Giulia Finotello, Roeland F., Kooiman Johan T., Padding Kay, Buist A., Alfred Jongsma, Fredrik Innings, Kuipers J.A.M. The dynamics of milk droplet–droplet collisions. Experiments in Fluids. 2018. P. 1–19.

percussion piston, so that the first necessary condition is to determine the optimal shape and size of these openings.

Openings of cylindrical shape. When the fluid enters the opening due to the inertia forces of the fluid particles, there is a narrowing of its stream. Then, at the outlet of the opening, the jet becomes equal to its diameter.

With this form of the opening, an absolute pressure of less than atmospheric pressure is established in the area of the jet narrowing. This causes the jet velocity at the outlet of the opening to become slower than in the narrowing zone.

At a pressure of more critical value, the absolute pressure at the point of narrowing of the jet in the opening reaches the pressure of vaporization, which promotes cavitation.

In the openings, having the form of a reverse truncated cone and a straight truncated cone, when the jet is narrowed at the outlet of the opening, the vacuum formations are smaller than in the cylindrical holes, so the loss of pressure is lower and the jet velocity in them is greater.

Vacuum voids are not formed in the openings having the conoidal shape, that is, openings made in the form of a compressed jet. Therefore, the feed rate in this case will be maximum, but the jet speed will be slightly less than in the previous case[6].

Among the viewed types of the openings:

– maximum milk feed rate have conoid openings

$$\mu = 0,947 - 0,979\,,\ \varepsilon = 1\,,\ \varphi = 0,947 - 0,979$$ [7];

– maximum flow rate of milk have conical openings, converging with the taper angle 45°

$$\varphi = 0,983\,,\ \varepsilon = 0,875\,,\ \mu = 0,857\,.$$

The carried out analysis showed that the conical shape of the openings with a taper angle of 45° is optimal, which provides maximum jet velocity and maximum productivity.

---

[6] Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н. Справочник по гидравлике. 2–е изд. Київ : Вища шк., 1984. С. 343.

[7] Wilbey, R. A. Homogenization of milk. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2002. P. 1346–1349. doi: 10.1016/ b0-12-227235-8/00202-9.

The diameter of the openings of the percussion piston is limited by the diameter of the piston and the manufacturability of the openings of the conical shape of the minimal diameter.

As a result of analytical studies for impulse homogenization of milk, it is considered appropriate to characterize the process of grinding the fat phase with a modified Weber criterion, We^i, which is based on the milk flow velocity gradient.

$$We^i = \frac{\rho_{pl} \cdot \left(\frac{dv}{dx}\right) \cdot d_k}{\sigma_{f-p}}, \quad (1)$$

where ρ_{pl} – milk plasma density, kg/m^3; $\frac{dv}{dx}$ – flow velocity gradient, m/s; d_k – critical particle diameter, m; $\sigma_{f\text{-}p}$ – surface tension of the drop, N / m.

When the critical value of the criterion We^i is reached, the fat globules are dirupted. The decisive roll in this case belongs to the velocity gradient.

Since this parameter is difficult to determine, it was decided to calculate the milk flow velocity and the pressure generated during impulse homogenization by computer simulation using the universal Ansys Workbench finite element analysis software[8]. This program has a CFX module that allows you to efficiently and reliably calculate fluid and gas dynamics.

Having the necessary understanding of the model of the working chamber and the geometric parameters of the homogenizer which were calculated previously, with the help of the automation system of design work in three dimensions Solidworks the working model of the camera of the impulse homogenizer had been designed (Fig. 2).

At the beginning of the task, the calculation area was divided into two parts for convenience: the area of milk passing through the openings in the percussion piston and the area of milk passage in the gap between the percussion piston and the cylinder.

[8] Басов К.А. Ansys: справочник пользователя. Москва : ДМК Пресс, 2005. С. 640.

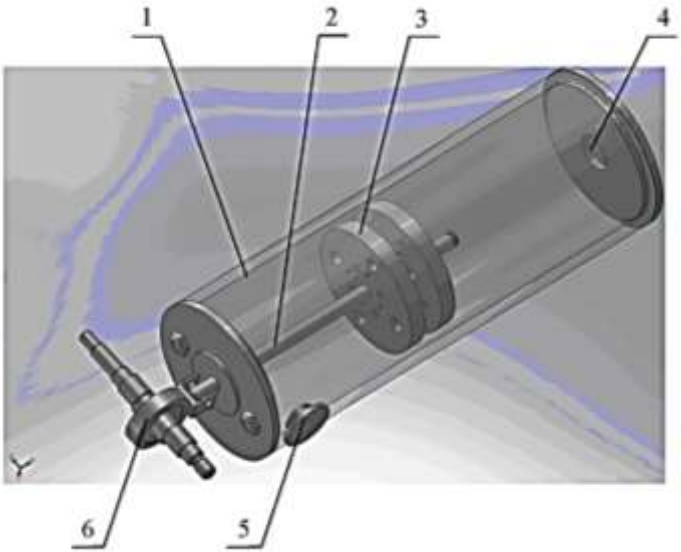


Fig. 2. Model of the impulse homogenizer working chamber is made in Solidworks: 1 – cylinder; 2 – spindle; 3 – percussion pistons; 4 – a branch pipe of supply of initial milk; 5 – branch pipe of draining homogenized milk; 6 – crank mechanism

In the first stage of the calculation, a fixed solution was made by the method of a fixed rotor (Frozen rotor). This allowed a preliminary estimation of the pressure and velocity distribution within the wotking cylinder. In addition, the obtained data showed that it would be most expedient to use the oscillation frequency of the percussion piston 55 Hz[9]. Since, at a smaller amplitude, the flow velocity of milk is very small, that is, it can be assumed that the process of homogenization at this frequency will not occur. And with the increase of the oscillation frequency of the percussion piston, the flow velocity does not increase significantly, and the power at the same time very much increases

[9] Гвоздєв О.В., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Комп'ютерне моделювання імпульсного гомогенізатора молока з використанням програмного забезпечення Ansys Workbench. *Обладнання та технології харчових виробництв: тематичний збірник наукових праць*. Донецьк : ДонНУЕТ. Вип. 28. 2012. С. 294–300.

(by 1.5 times). So in the future it was decided to make calculations at the oscillation frequency of the percussion piston 55 Hz.

An amplitude range of 12 mm was considered to calculate the non-stationary flow of milk. This interval was divided into 6 steps. As a result, the residuals in most equations did not exceed 10^{-5}. Such accuracy is perfectly acceptable for the qualitative assessment of the flow dynamics.

In the impulse homogenizer, the grinding of fat globules occurs due to the formation of a milk velocity gradient dν / dx. Therefore, in order to determine the degree of homogenization, one must first calculate the velocity gradient dν / dx during homogenization[10].

The flow lines of the milk flow velocity distribution depending on the distance x along the length of the working chamber are presented in fig. 3.

According to the obtained data, a graph (fig. 4) of the milk flow velocity versus distance along the length of the working chamber at f = 55 Hz and h = 10 mm was accordingly constructed.

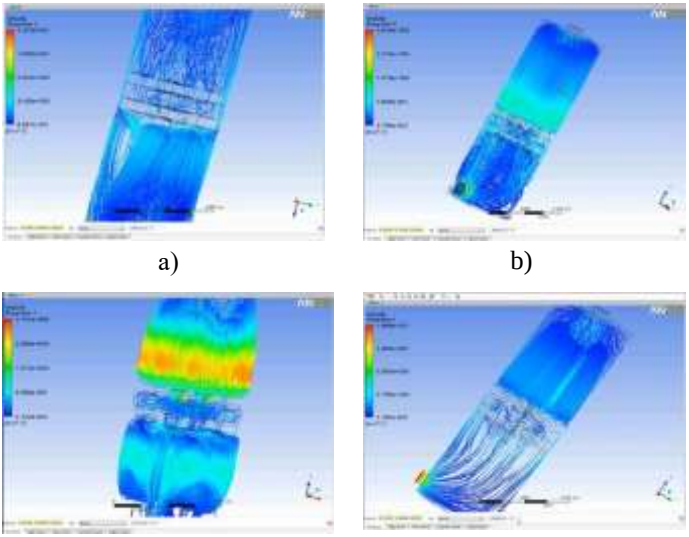
Therefore, as the graph shows, the highest velocity gradient (2.2… 5 m/s) will emerge at the outlet of the conical openings of the second percussion piston. It is logical to assume that the degree of homogenization in this case will be the highest.

At impulse homogenization energy is expended on the force of pressure on the piston and the force of milk supply to the percussion piston[11].

---

[10] Deynichenko G., Samoichuk K., Yudina T., Levchenko L., Palianychka N., Verkholantseva V., Dmytrevskyi D., Chervonyi V. Parameter optimization of milk pulsation homogenizer. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2018. Vol. 24. P. 63–67.

[11] Паляничка Н.О. Визначення шляхів зниження енерговитрат процесу гомогенізації молока. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*. Дніпропетровськ. 2016. №1(39). С. 53–56.



a) b)

c) d)

Fig. 3. Three-dimensional graphs of the flow velocity distribution lines of the milk flow in the impulse homogenizer are made in Ansys Workbench: a) at the outlet of the first percussion impactor; b) between the pistons; c) at the outlet of the second piston; d) outside the pistons

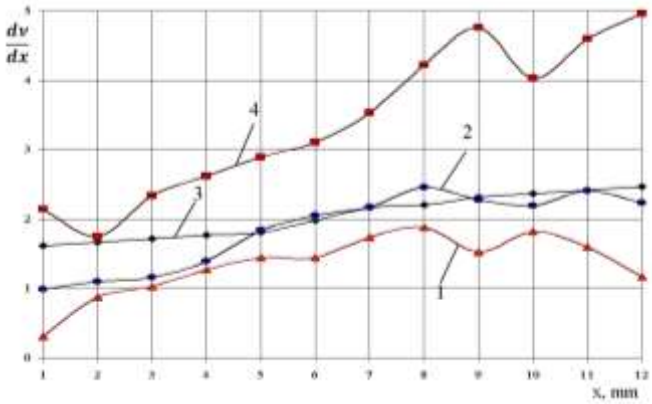


Fig. 4. Graph of dependence of velocity gradients on the length of the working chamber of the impulse homogenizer: 1 – at the exit of the first percussion piston; 2 – between the pistons; 3 – outside the pistons; 4 – at the exit of the second percussion piston

Excluding losses in local supports in the openings of the percussion piston, the power per impulse homogenization process, W, can be represented as

$$P = R \cdot \upsilon , \tag{2}$$

where R – force of pressure on the piston, H; υ – velocity of movement of the percussion piston (supply), m/s.

The force of pressure on the piston is determined by the formula

$$R = c \cdot \rho_c \frac{\upsilon^2}{2} \cdot S , \tag{3}$$

where c – resistance coefficient for circular plate, ***c=1,1 – 1,15***; S – piston area, S = 0,061 m^2.

Since in the impulse homogenizer the drive is made with the help of a crank, velocity of movement of the percussion piston (supply) will be determined by the expression [12]

$$\upsilon = \omega \cdot r \cdot \sin\varphi \cdot \left(1 + \lambda \cdot \cos\varphi\right), \tag{4}$$

where ω - angular velocity, $\omega = \frac{\pi n}{30}$, rad/s; r – crank radius, r =0,070 m; φ – the angle of rotation of the crank; λ – the ratio of the crank radius to the length of the spindle, m.

$$\upsilon = 4,71 \cdot 0,07 \cdot \sin 71^0 \cdot \left(1 + 0,34 \cdot \cos 71^0\right) = 0,35 \text{ m/s.}$$

After the transformations, we get

$$P = c \cdot \rho_c \cdot \frac{\upsilon^3}{2} \cdot S . \tag{5}$$

---

[12] Паляничка Н.О., Гвоздєв О.В., Самойчук К.О. Визначення енерговитрат на процес імпульсної гомогенізації молока. *Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції ”Состояние, достижения и перспективы переработки, стандартизации и сертификации лубоволокнистых материалов”*. Херсон, 2012. С. 47–48.

$$P = 1,1 \cdot 1029 \cdot \frac{0,35^3}{2} \cdot 0,061 = 1,48 \text{ kW}.$$

The specific energy consumption for impulse homogenization E_s, J / kg, is determined from the expression

$$E_s = \frac{P}{Q}. \tag{6}$$

$$E_s = \frac{1,48}{1800} = 0.82 \text{ J / kg}.$$

Thus, it can be noted that the specific cost of the impulse homogenization process is 0.82 J/kg, which is much less than in the valve homogenizer (7.4 J/kg).

2. Experimental research on the impulse homogenization process

To confirm the validity of the results of theoretical calculations, the full-factorial experiment was conducted in which the correlation between the degree of homogenization (Y), the amplitude of oscillations of the percussion piston (X_1), the frequency of oscillations (X_2), and the flow of milk into the impulse homogenizer (X_3) had been established.[13]

As a result of the full-scale experiment, the regression equation in coded representation was obtained

$$\begin{aligned} Y = 4,88 + 0,694X_1 + 0,602X_2 - 0,588X_3 + 0,2X_1X_2 + \\ + 0,426X_1^2 - 0,663X_2^2 - 0,459X_3^2. \end{aligned} \tag{7}$$

To analyze the results of the full-factorial experiment, presented in the form of a regression equation (7), which adequately describes the process of impulse homogenization of milk, a nomographic method was used, which allows to see simultaneously the parameter of optimization of all variables of the independent factors involved in the regression equation, that is how they affect the real technological process.

[13] Паляничка Н.О., Антонова Г.В. Експериментальні дослідження впливу основних факторів на ступінь гомогенізації в імпульсному гомогенізаторі. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2016. Вип. 16, Т. 1. С. 21–28.

Using the Mathcad computer program and the developed methodology, the nomogram (Fig. 5) was constructed to analyze and study the regression equation (7).

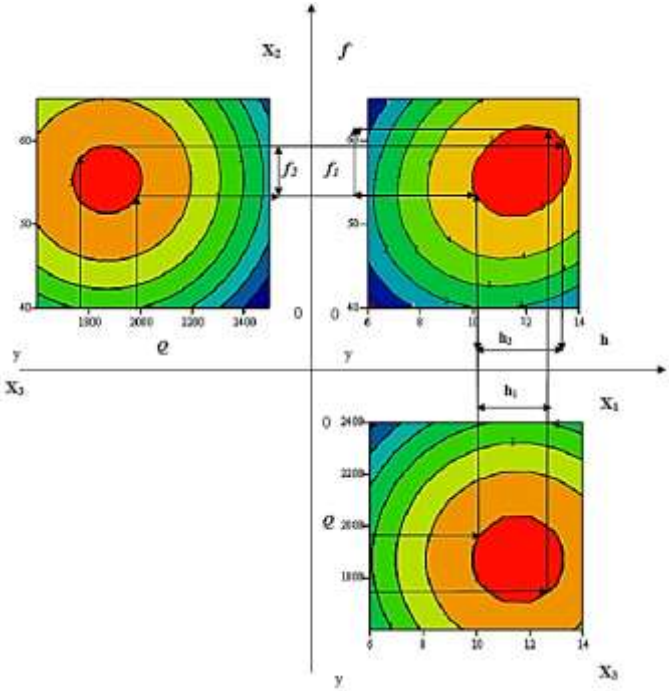


Fig. 5. Nomogram for analysis and determination of optimal parameters of the factors that ensure the degree of homonization of milk in the impulse homogenizer, not lower than 4

Thus, combining the obtained intervals of variation of factors, we obtain that for the impulse homogenizer with milk supply Q = 1800 – 2000 kg/h and the degree of homogenization 5, it is necessary to provide the following technological parameters of the homogenization process: h = 10 – 13 mm and f = 53 – 62 Hz[14].

[14] Важинський С.Е., Щербак ТІ. Методика та організація наукових досліджень : навч. посіб. Суми : СумДПУ імені А.С. Макаренка, 2016. С. 260.

The deviation of the theoretical values of h and f from the experimental parameters in the whole range of parameter changes is within 11%, which confirms the adequacy of the obtained data.

In order to determine the specific energy intensity of the process of homogenization of milk in the impulse homogenizer, the full-factorial experiment was conducted during which the correlation between the energy consumption for the process of impulse homogenization (Y), the amplitude of oscillations of the percussion piston (X_1), the frequency of the oscillations (X_2) and milk supply into the implulse homogenizer was determined[15].

The regression equation is obtained in coded form.

$$Y = 1{,}045 + 0{,}038X_1 + 0{,}032X_2 - 0{,}025X_3 + 0{,}19X_1^2 - 0{,}2X_2^2 - 0{,}2X_3^2. \quad (8)$$

Using the Mathcad computer program, a nomogram (Fig. 6) was constructed to analyze and study the regression equation (8).

By combining factors variation intervals, it was found that for impulsed homogenizer with milk supply Q = 1800 – 2250 kg/h and h = 10 – 12 mm and f = 43 – 59 Hz, the energy consumption for the homogenization process is 1,5 kW, and the specific energy consumption – 0.83 J/kg.

As a result of the optimum matching of the two nomograms, we can conclude that in order to obtain the maximum degree of homogenization Hm = 5 with minimum specific energy consumption E_s = 0.83 J/kg, it is necessary to create the following conditions: the amplitude of oscillations of the percussion piston h = 10 – 12 mm, the oscillations frequency f = 55 – 59 Hz and milk supply in the impulse homogenizer Q = 1800 – 2000 kg/h.

The deviation of the theoretical values of h and f from the experimental ones in the whole range of parameters change is less than 9%, which proves the adequacy of the obtained data.

To determine the optimal milk temperature for the impulse homogenization process, experimental studies of the dependence of the amplitude of the oscillation of the percussion piston, the frequency of oscillation of the piston, the flow of milk into the impulse homogenizer

[15] Паляничка Н.О. Експериментальне визначення якості гомогенізації молока в імпульсному гомогенізаторі.*Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків, 2016. Вип. 179. С. 39–44.

and the temperature of the degree of homogenization[16] have been carried out. Graphically dependencies are presented in fig. 7, 8 and 9.

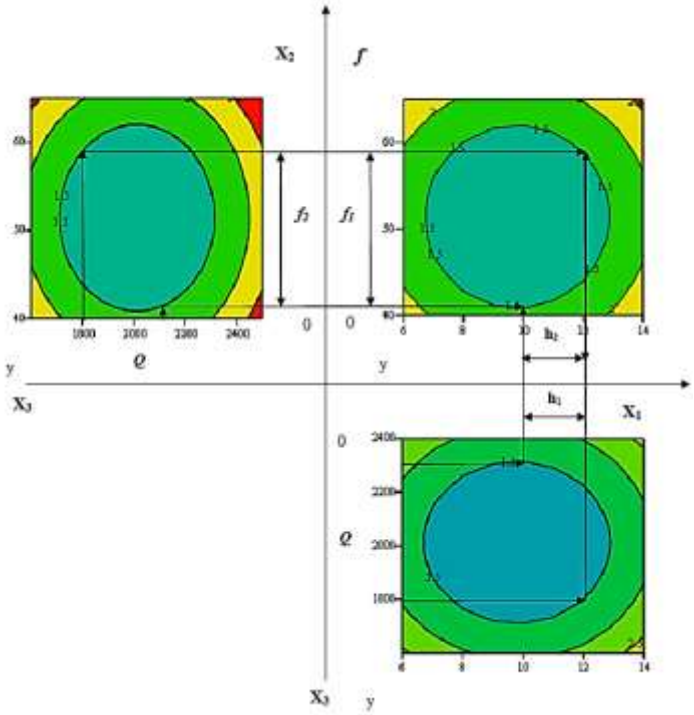


Fig. 6. Nomogram for analysis and determination of optimal parameters of the factors providing the minimum energy consumption for the process of impulse homogenization

During the experiment, it was found that changing oscillation frequency and milk flow in the impulse homogenizer along with the temperature causes linear grow in the degree of homogenization as well.

Analyzing the graphs, we can conclude that the optimal milk temperature for impulse homogenization is 65–70 ºC, since the excess of this temperature will affect the components of milk, in particular the

[16] Самойчук К.О., Ковальов О.О., Івженко А.О. Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, Вип. 12, Т. 4. 2012. С. 222–229.

stabilization of the fat emulsion, especially since the temperature is most close to production conditions.

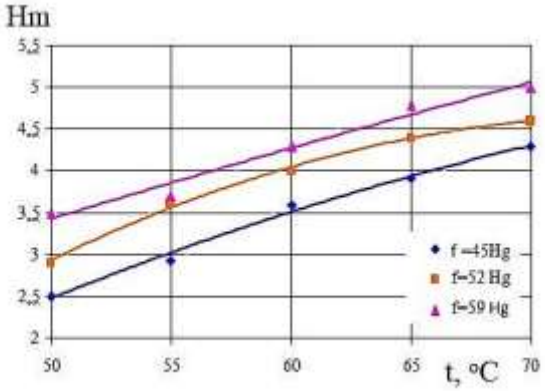


Fig. 7. Dependence of the degree of homogenization on the milk temperature at the frequency of oscillation of the percussion piston f = 45 – 59 Hz, the amplitude of oscillations h = 10 mm and the flow of milk into the pulse homogenizer Q = 1800 – 2200 kg/h

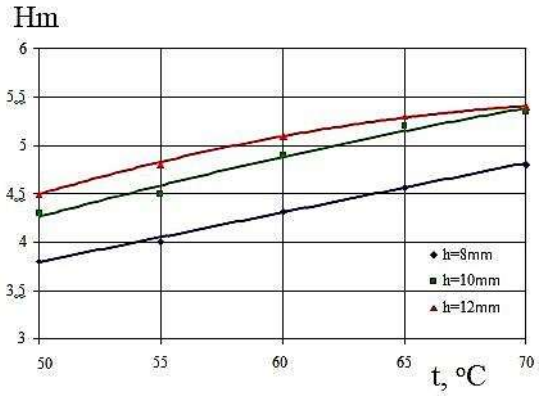


Fig. 8. Dependence of the degree of homogenization on the temperature of milk at the amplitude of oscillations of the piston-impactor h = 8 – 12 mm, the frequency of oscillations f = 55 Hz and the flow of milk into the impulse homogenizer Q = 1800 – 2200 kg/h

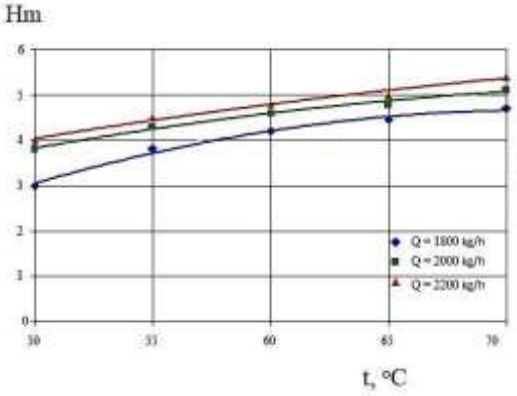


Fig. 9. Dependence of degree of homogenization on milk temperature at milk supply in the impulse homogenizer Q = 1800 – 2200 kg/h, oscillation amplitude h = 10 mm and oscillation frequency f = 55 Hz

The quality of homogenization of milk is determined by the index of milk fat settling χ[17]. Homogenization is considered to be qualitative when, $\chi < 10\%$. Fig. 10 presents the dependence of the index of settling milk fat on the temperature of milk homogenized at h = 10 mm, f = 55 Hz, Q = 1800 kg/h.

Analyzing the graph, we can conclude that at a temperature of milk from 55 to 70°C, the index of settling of milk fat χ <10%. Referring to previous studies, we can assume that the quality of homogenization in the impulse homogenizer is sufficient.

Fig. 11 shows the changes in the fractional composition of fat globules after homogenization in the impulse homogenizer compared to the valve homogenization[18].

Prior to homogenization, milk is characterized with the following parameters: average diameter of fat globules d_a = 2.48 μm, dispersion σ = 1.66, coefficient of variation (dissipation ratio relative to average) V = 67%. After valve homogenization and, respectively, impulse homogenization, these values are: d_a = 0.98 μm and 0.80 μm, σ = 0.50 and 0.46, V = 51 and 56%[19].

---

[17] Шмойлова Р.А. Теория статистики. 4–е изд. Москва : Финансы и статистика, 2004. 655 с.

[18] Сидоренко В.К., Хайруддінов М.А., Абдулгазис У.А. Основи наукових досліджень : навч. посібник. Сімферополь : СОКАТ, 2000. С. 168.

[19] Drankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering.* 2014. Vol. 4. Iss. P. 5–8.

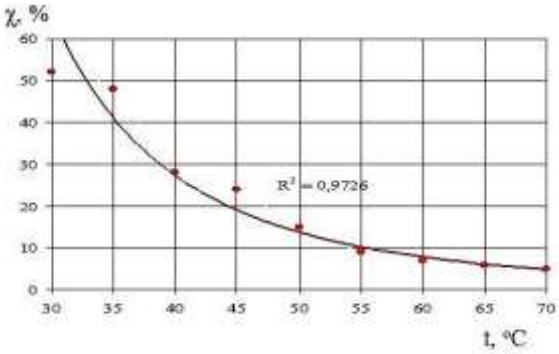


Fig. 10. Dependence of the indicator of the milk fat settling on the temperature of homogenization in the impulse homogenizer

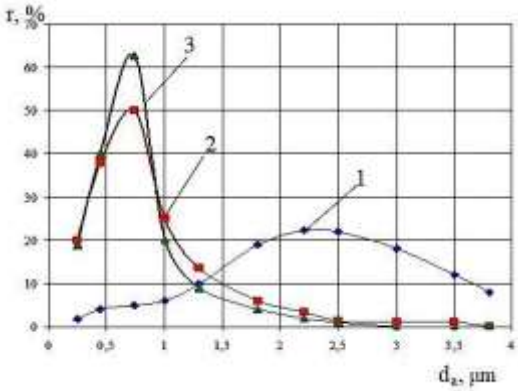


Fig. 11. Differential distribution of fat globules by size: 1 – unprocessed milk; 2 – after homogenization in the valve homogenizer at a pressure of 16 MPa and t = 65 ºC; 3 – after homogenization in the impulse homogenizer at a pressure of 1.5 MPa and t = 65ºC

The average diameter of the fat globules during impulse homogenizer treatment decreased by 19% compared to the valve, also the value of the dispersion decreased, which in turn indicates that the selected parameters and modes of impulse homogenization provide stability of the fat phase of milk after homogenization.

CONCLUSIONS

Designing new devices for the homogenization of fat emulsions that can provide a sufficient degree of dispersion at low energy costs for the process is quite relevant. The purpose of the conducted researches was to reduce energy consumption for the process of homogenization of milk by applying the process of impulse homogenization and optimization of technological and design parameters and modes of operation of the impulse homogenizer of milk.

As a result of the researches the following conclusions were made:

1. The analysis of the process of homogenization of milk has made it possible to establish that a high degree of homogenization can be achieved if the conditions for the appearance of a gradient of the flow velocity of milk, which leads to the grinding of fat globules, are created. These conditions in the impulse homogenizer are created by the intensification of the oscillation of the percussion piston, with the energy costs for the process of homogenization are significantly reduced.

2. The highest milk flow velocity gradient was found to emerge at the outlet of the conical openings of the second percussion piston. This, in turn, helps to create the conditions for the highest quality homogenization compared to the existing homogenizers.

3. Using the universal finite element analysis system Ansys Workbench it was determined that in order to obtain the maximum flow velocity gradient (2.2 – 5 m/s), it is necessary to create the following parameters of the impulse homogenizer: the amplitude of oscillations of the percussion piston 10 – 12 mm ; oscillation frequency of the percussion piston 55 – 59 Hz; milk supply 1800 – 2000 kg/h.

4. Conducted full-factorial experiment allowed to proove the validity of theoretical studies. It has been determined that the specific energy consumption for the process of impulse homogenization is determined mainly by the amplitude of oscillation of the percussion piston, the frequency of oscillation and milk supply in the impulse homogenizer and are at least 0.83 J/kg, which is 7 times less than the valve homogenizer. It was also found that the optimum temperature of the dispersion process in the impulse homogenizer is 65 – 70 ºC.

SUMMARY

The process of dispersing milk fat is the most energy-consuming process in the technological scheme of production of drinking milk and dairy products. The equipment used is not only high energy consuming but also quite expensive and energy intensive. Therefore, the current

issue remains to be the improvement of existing or designing new devices for the dispersion of fat emulsions, which will be able to provide high quality of the finished product at low energy costs for the process. It is possible to significantly reduce energy costs for the process of dispersing milk fat with a high degree of homogenization by using impulse homogenization. Conducted theoretical and experimental studies have shown that the use of the impulse homogenizer allows to obtain a high degree of homogenization (4–5), with the specific energy consumption for the process of 0.83 J/kg.

REFERENCES

1. Wilbey, R. A. Homogenization of milk. *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2002. P. 1346–1349. doi: 10.1016/ b0-12-227235-8/00202-9.
2. Michalski, M.-C. Januel C. Does homogenization affect the human health properties of cow's milk? *Trends in Food Science & Technology*. 2006. Vol. 17, Issue 8. P. 423–437. doi: 10.1016/j.tifs.2006.02.004.
3. Нужин Е.В., Гладушняк А.К. Гомогенизация и гомогенизаторы: монографія. Одесса : Печатный дом, 2007. С. 264.
4. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд : монография–справочник. Санкт-Петербург : ГИОРД, 2006. С. 392.
5. Huppertz, T. Homogenization of Milk | Other Types of Homogenizer (High-Speed Mixing, Ultrasonics, Microfluidizers, Membrane Emulsification). *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2011. P. 761–764. doi: 10.1016/b978-0-12-3744074.00226-0.
6. Гвоздєв О.В, Паляничка Н.О., Яворницький В.М. Пошук конструктивного рішення імпульсного гомогенізатора молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ. Вип. 8, Т. 7. 2008. С. 28–32.
7. Паляничка Н.О., Гвоздєв О.В. Аналіз існуючих гіпотез руйнування жирових кульок. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ. Вип.10, Т. 3. 2010. С. 48–54.
8. Giulia Finotello, Roeland F., Kooiman Johan T., Padding Kay, Buist A., Alfred Jongsma, Fredrik Innings, Kuipers J.A.M. The dynamics of milk droplet–droplet collisions. Experiments in Fluids. 2018. P. 1–19.
9. Большаков В.А., Константинов Ю.М., Попов В.Н. Справочник по гидравлике. 2–е изд. Київ : Вища шк., 1984. С. 343.

10. Барановский Н.В. Влияние гидравлических факторов на степень дисперсности жира при гомогенизации молока : дис. канд. техн. наук. Москва, 1985. С. 183.

11. Басов К. А. Ansys: справочник пользователя. Москва : ДМК Пресс, 2005. С. 640.

12. Гвоздєв О.В., Самойчук К.О., Паляничка Н.О. Комп'ютерне моделювання імпульсного гомогенізатора молока з використанням програмного забезпечення Ansys Workbench. *Обладнання та технології харчових виробництв: тематичний збірник наукових праць*. Донецьк : ДонНУЕТ. Вип. 28. 2012. С. 294–300.

13. Deynichenko G., Samoichuk K., Yudina T., Levchenko L., Palianychka N., Verkholantseva V., Dmytrevskyi D., Chervonyi V. Parameter optimization of milk pulsation homogenizer. *Journal of Hygienic Engineering and Design*. 2018. Vol. 24. P. 63–67.

14. Паляничка Н.О. Визначення шляхів зниження енерговитрат процесу гомогенізації молока. *Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету*. Дніпропетровськ. 2016. № 1(39). С. 53–56.

15. Паляничка Н.О., Гвоздєв О.В., Самойчук К.О. Визначення енерговитрат на процес імпульсної гомогенізації молока. *Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Состояние, достижения и перспективы переработки, стандартизации и сертификации лубоволокнистых материалов»*. Херсон, 2012. С. 47–48.

16. Паляничка Н.О., Антонова Г.В. Експериментальні дослідження впливу основних факторів на ступінь гомогенізації в імпульсному гомогенізаторі. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2016. Вип. 16, Т. 1. С. 21–28.

17. Важинський С.Е., Щербак ТІ. Методика та організація наукових досліджень : навч. посіб. Суми : СумДПУ імені А.С. Макаренка, 2016. С. 260.

18. Паляничка Н.О. Експериментальне визначення якості гомогенізації молока в імпульсному гомогенізаторі.*Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків, 2016. Вип. 179. С. 39–44.

19. Самойчук К.О., Ковальов О.О., Івженко А.О. Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, Вип. 12, Т. 4. 2012. С. 222–229.

20. Шмойлова Р.А. Теория статистики. 4–е изд. Москва : Финансы и статистика, 2004. С. 655 с.
21. Сидоренко В.К., Хайруддінов М.А., Абдулгазис У.А. Основи наукових досліджень : навч. посібник. Сімферополь : СОКАТ, 2000. С. 168.
22. Drankhar P. Homogenization fundamentals. *IOSR Journal of Engineering.* 2014. Vol. 4. Iss. P. 5–8.

Information about authors:
Samoichuk K. O.,
Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Processing and Food Production Equipment named after professor F. Yalpachik
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
18, B. Khmelnytskoho ave., Melitopol,
Zaporizhzhia region, 72312, Ukraine

Palianychka N. O.,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Processing and Food Production Equipment named after professor F. Yalpachik
Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University
18, B. Khmelnytskoho ave., Melitopol,
Zaporizhzhia region, 72312, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.22

ІМОВІРНІСНИЙ РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ РАМ

Чичуліна К. В., Чичулін В. П.

ВСТУП

Однією з важливих задач, яка постає перед будівельною наукою, є зниження матеріалоємності, трудомісткості і вартості на етапах проектування, будівництва та експлуатації будівель та споруд у процесі забезпечення їх довговічності та надійності. Застосування в розрахунках будівельних конструкцій теорії надійності забезпечує сприятливі передумови для нормування розрахункових параметрів конструкцій на імовірнісній основі. Алгоритм розрахунків заснований на ймовірнісному підході. Цей розрахунок можна віднести до багатьох видів конструкцій, у тому числі до сталевих статично не визначених рам. Такі конструкції застосовуються в каркасах будівель та споруд різноманітного призначення. Відомо, що в сталевих статично не визначених конструкціях існують деякі резерви несучої здатності, не враховані під час проектування. Ці резерви існують за рахунок роботи системи у пластичній стадії з виникненням ряду шарнірів пластичності. Робота сталевих статично не визначених конструкцій також не вивчена в імовірнісній постановці з урахуванням випадкової природи міцності та навантаження, а також випадкового характеру відмов елементів. У зв’язку із цим розвиток методів імовірнісних розрахунків сталевих статично не визначених конструкцій, які можливо втілити в інженерну практику проектування, є задачею важливою і актуальною в умовах сьогодення.

Сталеві статично невизначені конструкції можуть використовуватися в каркасах будівель різного призначення, робочих майданчиках, етажерках під технологічне обладнання тощо. Однією з найбільш важливих обставин аналізу роботи конструкцій є врахування пластичних властивостей матеріалу. Сьогодні досліджено теоретично та експериментально, що несуча здатність статично не визначених систем зберігається і після виникнення в її елементах пластичних деформацій.

Сучасні експериментальні дані показують, що метод граничної рівноваги дозволяє відносно достовірно оцінювати несучу здатність сталевих статично не визначених конструкцій. Особливості методу граничної рівноваги представлено в небагатьох джерелах[1].

Найбільш важливою властивістю об'єкта є безвідмовність[2], яка полягає у збереженні працездатності протягом заданого часу. Визначається як імовірність відмови за визначений проміжок часу $Q(t)$. Для даної роботи безвідмовність оцінюється за критерієм несучої здатності.

Розрахункові величини в будівельних конструкціях можна розподілити на дві основні групи. До першої групи відноситься узагальнена несуча здатність конструкції $\tilde{R}$, до другої групи відноситься узагальнене навантаження $\tilde{F}$. Відповідно до деяких літературних джерел[3] умова безвідмовності має вигляд:

$$\tilde{S} = \tilde{R} - \tilde{F} > 0 . \qquad (1)$$

У даній постановці несуча здатність і навантаження конструкцій подаються як випадкові величини. Для роботи, що пропонується, вони підпорядковуються нормальним законам розподілу випадкових величин.

На даний час малодослідженими залишаються питання імовірнісного розрахунку сталевих статично невизначних конструкцій. В інженерній практиці відсутні методи і програми, які ураховують реальну роботу матеріалу, а також імовірнісні характеристики міцності і навантаження. Дослідження статично не визначених систем ускладняються внаслідок перерозподілу зусиль після відмови окремих елементів. Моделі руйнування систем характеризуються складною розгалуженою структурою шляхів

---

[1] Cheng Y.M., Li D.Z., Li L., Sun Y.J., Baker R.,Yang Y. Chapter 4 – System-Level "Limit equilibrium method based on an approximate lower bound method with a variable factor of safety that can consider residual strength". *Computers and Geotechnics*. 2011. Vol. 38. No. 5. P. 623-637. DOI:10.1016/j.compgeo.2011.02.010.

[2] Huang G., Chen X., Yang Zh., Wu B. Exact analysis and reanalysis methods for structures with nonlinear boundary conditions. *Computers & Structures*. 2018. Vol. 198. P. 12–22. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.01.004.

[3] Wang J. Chapter 4 – System-Level "Fail-Safe". *Safety Theory and Control Technology of High-Speed Train Operation*. 2018. P. 125-144, DOI: 10.1016/B978-0-12-813304-0.00004-9.

відмов елементів, які в кінці перетворюють конструкцію на змінну систему. Для практичної оцінки надійності статично не визначених систем необхідно використовувати прості, але досить близькі до реальної роботи методи розрахунку. Одним із таких методів є імовірнісний метод граничної рівноваги.

Сучасним питанням надійності будівельних конструкцій, зокрема розрахункам надійності сталевих рам, загалом присвячено багато робіт. Запропоновано метод для ефективної оцінки надійності пружно-ідеально-пластичних конструкцій[4]. Граничний стан оцінюється з точки зору ймовірнісного множника. Навантаження оцінюється шляхом розв'язання серії завдань лінійного програмування, відповідей, що лежать в основі лінійної пружної моделі і самостійного розподілу напруг. Ефективність запропонованої процедури забезпечується простотою задачі математичного програмування, базові структурні моделі вирішується на кожній ітерації, ефективність підмножина моделювання. Дійсність підходу забезпечується динамічною теорією пристосовності, яка ілюструється на приклад сталевої рами. У дослідженнях[5] розглядаються система коефіцієнтів опору через аналіз надійності двох моментів сталевих рам під комбінованим навантаженням власної ваги та вітровим навантаженням. Рами розроблені з використанням нееластичного аналізу другого порядку, оцінюються їхні міцність та надійність. Розглянуто вплив на надійність системи коефіцієнта опору системи та коефіцієнта навантаження від вітру та власної ваги. Виявлені особливості методології проектування на основі надійності системи.

Розглядається питання вибору ефективної довжини балок для моделей рамних каркасів, широко використовуються сейсмічний опір системи, з метою мінімізації кількості дисперсії в конструкціях[6]. Оцінка була проведена за допомогою запропонованого рівняння з

---

[4] Tabbuso P., M.J. Spence S., Palizzolo L., Pirrotta A., Kareem A. An efficient framework for the elasto-plastic reliability assessment of uncertain wind excited systems, *Structural Safety*. 2016. Vol. 58. P. 69–78. DOI: 10.1016/j.strusafe.2015.09.001.

[5] Zhang H., R. Ellingwood B., J.R. Rasmussen K. System reliabilities in steel structural frame design by inelastic analysis, *Engineering Structures*. 2014. Vol.58. P. 341–348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.003.

[6] Najafi L.H., Tehranizadeh M. Equation for achieving efficient length of link-beams in eccentrically braced frames and its reliability validation, *Journal of Constructional Steel Research*, 2017. Vol.130. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.11.020.

урахуванням різної висоти конструкцій, схильних до зміщення. Крім того, оцінка надійності рамних конструкцій проводиться відповідно до перевірки запропонованих рівнянь з урахуванням ймовірності відмови для кожної моделі. Відповідність ефективної довжині балки досягається на основі детермінованого аналізу за допомогою запропонованих рівнянь та імовірнісного аналізу. Досліджено потенційні обвалення металоконструкцій, руйнування з'єднань з урахуванням невизначеності властивостей матеріалу, таких як межа плинності, навантаження і модуль пружності. Балочні кінці обертання були використані в якості членів-рівень граничних станів на прогресуюче обвалення. Моделювання конструкцій із трьома різними типами з'єднань проводилися після видалення однієї з колон. Криві нестійкості були отримані виходячи з імовірності перевищення заданого граничного стану для вертикального переміщення. Представлено алгоритм для надійності на основі сейсмічного проектування конструкцій, що включає наближені методи оцінки ефективності та структурної оптимізації[7]. Запропонований алгоритм дозволяє автоматичне проектування моментів опору сталевих рам із використанням критеріїв надійності. Такі критерії дозволяють встановлювати інженерні обмеження і отримувати будівельні конструкції поліпшених показників продуктивності і низької вартості. У даній роботі запропоновано спрощений підхід, який дозволяє швидко обчислити межу-стан середньої річної частоти без суттєвої втрати точності. Проблема оптимізації вирішується спеціально розробленим алгоритмом. Три- і дев'ятиповерхова сталева рама використовується для демонстрації ефективності запропонованої процедури, що призводить до оптимальної конструкції будівлі.

Імовірнісна втрата стійкості не визначених рам вивчається за допомогою стохастичного методу кінцевих елементів[8]. Статистика втрати стійкості пружних рам із випадковою початковою нелінійністю, невизначеними перерізами і властивостями матеріалу виводиться із статистики основних параметрів системи з використанням стохастичного методу кінцевих елементів.

---

[7] Zacharenaki A. E., Fragiadakis M., Papadrakakis M. Reliability-based optimum seismic design of structures using simplified performance estimation methods, Engineering Structures. 2013. Vol.52, P. 707–717. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.03.007.

[8] Lin S.C., Kam T.Y. Buckling failure probability of imperfect elastic frames", *Computers & Structures*, 1992. Vol.44. No. 3. P. 515–524. DOI: 10.1016/0045-7949(92)90384.

Досліджено вплив варіації геометричної нелінійності, перетину і властивостей матеріалу на відмінності в стійкості і міцності. Імовірність відмови від нелінійності рам, що складаються з випадкових параметрів систем з урахуванням випадкових навантажень, розраховується у просторі завантаження. Визначені фактори, що впливають на надійність рами. З'ясовано, що секційні властивості, форми та величина геометричної нелінійності може зробити істотний вплив на надійність рами. Відмічають[9], що проектування систем сталевих конструкцій на основі розширеного аналізу призводить до більш ефективного процесу проектування і забезпечує більш рівномірний рівень структурної надійності системи. Основною перешкодою для впровадження цього методу у практиці є очевидна складність у призначенні відповідного коефіцієнта опору конструктивних систем. Також було запропоновано ефективний чисельний метод визначення надійності на основі оптимізації конструкції сталевих рам[10]. У цій задачі цільова функція направлена на мінімізацію ваги всієї сталевої рами. Змінними у проектуванні є балки і колони поперечного перерізу, які розглядаються як дискретні змінні, так і обраний із комплекту широкої форми фланець сталевих профілів. Випадкові змінні відносяться до властивостей матеріалів і прикладених навантажень. Для аналізу поведінки сталеві рами використовується метод кінцевих елементів для каркасних конструкцій. Усі ймовірнісні обмеження відносяться до детермінованих обмежень. Це допомагає перетворити проблеми в детермінованій задачі оптимізації, яка може бути вирішена за допомогою стандартних алгоритмів оптимізації. Це дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати для розв'язання вихідної задачі.

У роботі[11] представлені точні та ефективні чисельні процедури для оцінки надійності системи сталевих каркасів із напівжорсткими

---

[9] W. Liu, J.R. Rasmussen K., Zhang H. Systems Reliability for 3D Steel Frames Subject to Gravity Loads, *Structures*, 2016. Vol. 8. P.2. P. 170-182. DOI: 10.1016/j.istruc.2016.06.002.

[10] Le Linh A., Bui-Vinh T., Ho-Huu V., Nguyen-Thoi T. An efficient coupled numerical method for reliability-based design optimization of steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 138. P. 389–400. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.08.002.

[11] Thai H.-T., Uy Br., Kang W.-H., Hicks S. System reliability evaluation of steel frames with semi-rigid connections, *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol.121, P. 29-39, DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.01.009.

сполученнями. Кінцева міцність і поведінка рами були передбачені за допомогою моделі пружно-пластичного шарніра. Досліджувалась чутливість надійності моделей. Моделювання за методом Монте-Карло було використано для оцінки ймовірності відмови і показника надійності системи. Розглядались два приклади рамних конструкцій під комбінованим і вітровим навантаженням, розглянуто показники надійності системи міцності і працездатності до граничного стану оцінювалися за випадковістю навантаження, матеріалу і геометричних властивостей і напівтвердого з'єднання. Результати показали, що надійність рами дуже сильно залежить від напівтвердого з'єднання. Вплив різних послідовностей навантаження на детерміновану стійкість сталевих конструкцій (нееластичний діапазон) є добре вивченим явищем[12]. Однак вплив різних послідовностей навантаження на надійність елементів та рами зі сталі не було спеціально вивчено в минулому. Результати дослідження показують важливість послідовності навантаження на рівні розкиду і неперевищення вірогідності опору. Розглядаються також потенційні врахування послідовності навантажування під час оцінки надійності сталевих рам.

1. Імовірнісний розрахунок методом станів

Розглянуті методи ймовірнісного розрахунку сталевих статично не визначених рам за умови різноманітних видів відмов елементів. Найбільш повно враховує хід руйнування конструкції метод перебору всіх можливих станів. Графічно метод станів представляється у вигляді орієнтованого графа. Вершини графа виражають стан, в якому знаходиться конструкція, а ребра представляють умовні імовірності відмови відповідних елементів. Для обчислювання імовірнісних характеристик графів-дерев використовуються методи математичної логіки. Імовірність відмови статично не визначених систем у цілому Q_s згідно із графом відмов представляється виразом логічного складання (диз'юнкції) всіх можливих (і-тих) шляхів (кон'юнкцій) відмови перетинів q_{ij}:

$$Q_s = \bigvee_{i=1}^{m} \left(\bigwedge_{j=1}^{n} q_{ij} \right), \tag{2}$$

[12] Taras A., Huemer St., On the influence of the load sequence on the structural reliability of steel members and frames, *Structures.* 2015. Vol.4. P. 91-104. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.10.007.

де m – загальна кількість шляхів (підграфів) відмов для даної конструкції; n – кількість j-х відмов перетинів, вхідних в і-й шлях.

Модель відмов рами у вигляді графу станів математично представляється у вигляді матриці безпосередніх зв'язків. Така матриця методом виключення вузлів перетворюється в матрицю повних зв'язків. Елемент матриці повних зв'язків аналітично виражає усі логічні зв'язки між входом і виходом графа станів.

Розглядались крихкі і пластичні відмови конструкції. У випадку крихких відмов елемент виключається з роботи, а конструкція в цілому продовжує функціонувати. Пластична відмова припускає виникнення в перетині шарніру пластичності.

Загальна схема імовірнісного розрахунку методом станів приведена на рис. 1.

ІМОВІРНІСНИЙ РОЗРАХУНОК МЕТОДОМ СТАНІВ

Складання розрахункової схеми конструкції; підбір перетинів елементів згідно з нормами проектування.	1
Складання схеми відмов перетинів елементів конструкції, будування графу станів системи і його розмітка	2
Статичний розрахунок конструкції з урахуванням усіх можливих варіантів відмов перетинів згідно із графом	3
Визначення імовірності відмови перетинів згідно з даними статичного розрахунку конструкції	4
Побудова матриці безпосередніх зв'язків згідно із графом станів	5
Отримання характеристик перетинів і ймовірності відмови статично невизначеної системи Q_s	6
Порівняння $Q_{\underline{s}}$ із вхідною ймовірністю відказу одного перетину, запроектованого за нормами, шляхом зміни перетинів елементів рами	7

Рис. 1. План-схема розрахунку надійності рам методом перебору станів

Аналіз шляхів руйнування конструкції показав, що ймовірність відмови системи в цілому найчастіше чисельно наближається до ймовірності відмови за одним найбільш імовірним шляхом відмови перетинів. Значення ймовірності відмови системи значно менше ймовірності відмови до першого відмови перетинів рами. Метод перебору станів можливо використовувати для невеликих рам (<20 перетинів) у зв'язку з різким зростанням об'єму розрахунків. Для подолання труднощів щодо зростання розміру завдання пропонується метод розрахунку, побудований на використанні одного найбільш імовірного (істинного) механізму руйнування.

Відомо, що розподіл зусиль під час пластичного руйнування не залежить від історії навантаження та поведінки конструкції до її повного пластичного руйнування. Тому для розрахунку сталевих статично не визначених рам, виконаних із пружно-пластичного матеріалу, можливо розглядати фазу вичерпання несучої здатності конструкції, їх пластичне руйнування.

Наведене положення використовується в методі граничної рівноваги. У розрахунку приймаються такі передумови для використання методу граничної рівноваги:

1) прикладання навантаження належить до квазістатичного типу;

2) матеріал конструкцій ідеально пружно-пластичний і підпорядковується діаграмі Прандтля;

3) рівняння складаються для недеформованої схеми;

4) перетин елементів має ідеальну форму, тому зона пластичного шарніру обмежується крапкою;

5) основними діючими зусиллями є згинаючі моменти.

Розроблена процедура розрахунку надійності статично не визначених систем, в якій умови для шарнірів пластичності мають вигляд рівнянь гіперплощин в $(k+1)$ – мірному гіперпросторі:

$$\sum_{j=1}^{k} M_{ij} \cdot x_j + q \cdot M_{io} = M_{i,pl} \quad (i=1,2,...,n), \qquad (3)$$

де $M_{i,pl}$ – граничний момент в і-му перетині; M_{ij} – момент в і-му перетині основної системи від зайвого невідомого $x_j = 1$; M_{io} – момент в і-му перетині від зовнішніх навантажень q, параметр яких приймається $q = 1$.

Пересікання гіперплощин визначає вершину багатогранника умов, із неї розраховується максимальне значення навантаження q_{max}. Із рішення $(k+1)$ лінійних рівнянь (4) та підстановкою у праву частину середніх граничних моментів $\bar{M}_{r,pl}$. Переходячи до області випадкових величин, маємо математичне очікування міцності рами в цілому:

$$\bar{q} = \sum_{r=1}^{k+1} \frac{A_{r,k+1}}{D} \cdot \bar{M}_{r,pl} = \sum_{r=1}^{k+1} \frac{A_{r,k+1}}{D} \cdot \mu_r \cdot \bar{M}_{o,pl}\ , \qquad (4)$$

де D – визначник системи рівнянь; $A_{r,k+1}$ – алгебраїчне доповнення елементів $\bar{M}_{r.pl}$ визначника D; $M_{o,pl}$ – середнє значення параметру граничного моменту рами; μ_r – складові частини вектору співвідношень граничних моментів рами; r – номер шарніру пластичності.

Стандарт міцності рами у просторі параметру навантаження визначиться:

$$\hat{q} = \sqrt{\sum_{r=1}^{k+1}\left(\sum_{r=1}^{k+1} \frac{A_{r,k+1}}{D} \cdot \hat{M}_{r,pl}\right)^2} = \rho_2 \cdot \hat{M}_{o,pl}\ . \qquad (5)$$

Згідно з алгоритмом за складеною програмою були виконані розрахунки імовірності відмови тридцяти рам різноманітної конфігурації. Окремо призначено проектне, чи діюче навантаження. Розраховані імовірності відмови статично не визначених систем у цілому мають невелику розбіжність – від $3.99 \cdot 10^{-11}$ до $1.6 \cdot 10^{-16}$. Розрахунки виконані за мінливості міцності і навантаження 0,1 і 0,2 і відхилення розрахункових значень від середньої міцності і навантаження 3 і 5 стандартів відповідно. Це дається для ймовірності відмови окремого елементу значення $Q_{icx} = 5,6 \cdot 10^{-8}$, запроектованого згідно з нормами.

Оцінка надійності систем у цілому за одним механізмом руйнування чисельно виправдана, але дійсно існують механізми, які мають імовірність появи, близьку до найбільш імовірного механізму. Тому відповідальність елементів, вхідних до даних

механізмів, досить висока, і їх необхідно враховувати в імовірнісних розрахунках статично не визначених систем.

2. Імовірнісний метод граничної рівноваги

Розроблено імовірнісний метод граничної рівноваги для оцінки надійності сталевих статично не визначених рам при пластичних відмовах елементів.

Згідно з рівнянням зовнішньої і внутрішньої віртуальної роботи ймовірність відмови для окремого і-го механізму руйнування має вигляд:

$$P(E_i) = P\left(\sum_{j=1}^{m} \tilde{P}_j \cdot f_j > \sum_{k=1}^{n} \tilde{M}_{pl,k} \cdot v_k\right) = P\left(\tilde{F}_i > \tilde{R}_i\right), \qquad (6)$$

де P_j – значення j-го зовнішнього навантаження; $M_{pl,k}$ – пластичний момент у k-му перетині із пластичним шарніром; f_j, v_k – повороти чи переміщення вузлів і стержнів відповідно.

Для рами визначаються основні (елементарні) механізми руйнування:

$$l = j\text{-}k, \qquad (7)$$

де j – кількість небезпечних перетинів; k – ступінь статичної невизначеності рами.

До числа основних механізмів руйнування належать балочні, зсувні (поверхові) і вузлові механізми. Аргументами в рівняннях рівноваги виявляються випадкові параметри навантаження і міцності. Далі з основних механізмів шляхом їх сполучення отримують комбіновані механізми. Ці механізми відображають багатогранність форм відмов конструкції, що розглядаються. Під час отримання комбінованих механізмів проводиться відбір найбільш імовірних (пропонується, $Q_i > Q_{пр} = 10^{-30}$). Виключаються також ті механізми, в яких кількість шарнірів пластичності більше, ніж ступінь статичної невизначеності рами плюс один.

Згідно з кінематичною теоремою граничної рівноваги конструкція руйнується під час реалізації не менше, ніж однієї з подій E_i. Тому ймовірність відмови системи в цілому визначається:

$$Q_s = P(E_1) + P(E_2) + ... - P(E_1 \wedge E_2). \quad (8)$$

Відмову одночасно двох механізмів $P(E_i \wedge E_j)$ необхідно розглядати з урахуванням кореляційного зв'язку в залежності від спільних пластичних шарнірів і навантажень. Коефіцієнт парної кореляції, що застосовується для цього, між i-м і j-м механізмами знаходиться як:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{m} A_{ik} \cdot A_{jk} \cdot \sigma_r^2 + \sum_{l=1}^{n} B_{il} \cdot B_{jl} \cdot \sigma_s^2}{\sigma_i \cdot \sigma_j}, \quad (9)$$

де A_{ik}, A_{jk} – віртуальні переміщення вузлів, відповідно, для i-го и j-го механізму в k-му перетині; σ_r, σ_s – середнє квадратичне відхилення (стандарт) відповідно до несучої здатності і навантаження; B_{il}, B_{jl} – віртуальні переміщення стержнів від l-го навантаження; σ_i, σ_j – стандарт резерву міцності для i-го та j-го механізмів руйнування.

Розрахунок імовірності відмови двох механізмів одночасно $P(E_k \wedge E_l)$ з урахуванням кореляційної залежності за умови нормального розподілу випадкових величин виконується за виразом:

$$Q_{kl} = (0.5\text{-}\Phi(v_k)) \cdot (0.5\text{-}\Phi(v_l)) \cdot \sqrt{1\text{-}r_{kl}^2} \cdot \exp(r_{kl} \cdot v_k \cdot v_l), \quad (10)$$

де Ф – таблична функція Лапласа; β_k, β_l – характеристики безпеки заміняються на

$$v_k, v_l : v_k = \frac{\beta_k}{\sqrt{1 - r_{kl}^2}}, \; v_l = \frac{\beta_l}{\sqrt{1 - r_{kl}^2}} .$$

Імовірнісний метод граничної рівноваги реалізовано під час розрахунку імовірності відмови статично не визначених систем

також методу узагальненої коваріації[13] та методу PNET[14]. Усі ці методи в області малих ймовірностей дають близькі результати. Схема розрахунку імовірнісним методом граничної рівноваги приведена на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема розрахунку ймовірнісного методу граничної рівноваги

Одним із факторів, які впливають на несучу здатність елементів статично не визначених систем, є поздовжня сила. Така сила

[13] Fan W., Yang P., Ang A. H-S., Li Z. Analysis of complex system reliability with correlated random vectors, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2016, Vol. 45. P. 61–69. DOI: 10.1016/j.probengmech.2016.03.004.

[14] Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. *Technical University of Denmark maritime engineering*. 2003. 323 p.

враховується в імовірнісний метод граничної рівноваги для стиснуто-зігнутих стержнів як частка у граничному згинаючому моменті:

$$M_{pl,n} = \left[1 - \left(\frac{N}{N_{pl}}\right)^{j}\right] \cdot M_{pl} = m_k \cdot M_{pl}\,, \qquad 11)$$

де j – показник ступеню, для двотавру рівний 1.5; N – повздовжня сила в елементі; N_{pl} – пластична несуча здатність стиснутого елементу; M_{pl} – пластичний згинаючий момент для даного елементу.

Коефіцієнт умов роботи m_{k} враховує вплив повздовжньої сили в стиснуто-зігнутих елементах, попередньо його приймають рівним 0.85.

Для отримання можливості впливати на статично невизначені системи без зниження її працездатності необхідно використовувати таку характеристику, як вклад і-го елементу в надійність конструкції у цілому R_{s}, він знаходиться як:

$$B_i = R_i \cdot \xi_i = R_i \cdot \frac{dR_s}{dR_i} = Q_s - Q_{s1}, \qquad (12)$$

де ζ_{i} – значущість і -го елементу; Q_{sl} – імовірність відмови системи при надійності окремого елементу $R_{\text{i}} = 1$.

У роботі показано, що ефективно використовувати визначення вкладу окремих основних механізмів руйнування, а не окремих небезпечних перетинів.

Для врахування статистичної природи міцності і навантаження пропонується вводити в розрахунок сталевих статично невизначних рам коефіцієнт надійності γ_{s}. Коефіцієнт надійності знаходиться таким чином:

$$\gamma_s = \frac{M_{o(pl)}}{M_{o(VMPR)}}\,, \qquad (13)$$

де $M_{o.(pl)}$ – граничний момент, отриманий із пружно-пластичного розрахунку рами; $M_{o.(vmpr)}$ – граничний момент, отриманий за імовірнісним методом граничної рівноваги.

Використовувати γ_s можна під час підбору перетинів елементів сталевих рам як коефіцієнт умов роботи. Під час розрахунку з урахуванням однопараметричного навантаження до тридцяти рам отримані коефіцієнти 1.2-1.4. Їх можливе використання забезпечить значну економію матеріалу.

Для практичного використання в інженерних розрахунках сталевих статично не визначних рам рекомендується коефіцієнт γ_s = 1.1. Його введення не вимагає додаткових розрахунків надійності рам. Використання більших коефіцієнтів потребує розрахунків згідно з розробленим методом.

Для врахування випадкової природи діючих на конструкцію зовнішніх факторів в імовірнісному методі граничної рівноваги використовується критерій багатопараметричного навантаження. Кожне навантаження подається як випадковий параметр. Для комбінованого механізму сумарне навантаження складається згідно із правилами складання випадкових величин з обов'язковим урахуванням кореляційних зв'язків між навантаженнями.

Імовірнісний розрахунок завершується рівнянням імовірності відмови системи в цілому Q_s і ймовірності відмови одного перетину Q_{icx}, запроектованого згідно з нормами.

Виконані розрахунки сталевих статично невизначних рам із реальним та пропорціональним навантаженням у пружний та пружно-пластичний стадії. За імовірнісним методом граничної рівноваги розраховано 30 рам різного призначення і конфігурації (одно-, двох-, трьохповерхові, одно-, двох-, трьохпролітні). Рами завантажені діючими чи проектними навантаженнями. Відбувалось порівняння згинаючих граничних моментів, які приходяться на одиничну жорсткість.

За результатами обчислення було підтверджено, що введення пружно-пластичного розрахунку у практику проектування статично не визначених систем дозволяє урахувати у середньому 10% резерву несучої здатності рам у порівнюванні із пружним розрахунком. Розрахунок імовірнісним методом граничної рівноваги під час порівняння ймовірності відмови рами з імовірністю відмови одного елемента до першого дозволяє урахувати додатково у середньому 20-25% резерву несучої

здатності. Розрахунок імовірнісним методом надає такі результати в порівнянні із пружно-пластичним розрахунком.

За розробленою методикою визначення значущості, вкладу і питомого вкладу окремих основних механізмів руйнування були проведені розрахунки тридцяти рам. За результатами складені діаграми питомих вкладів окремих основних механізмів. Під час дослідження діаграм можна відмітити, що питомі вклади в цілому розподіляються нерівномірно для більшості рам. Розкид вкладів різних елементів (10-30% за величиною несучої здатності) відкриває можливе поле діяльності з їх порівняння й урахування при цьому виникаючих резервів конструкцій. На діаграмах питомих вкладів для більшості рам виділяються один або два (частіше один) елементарних механізми, які складають основу найбільш імовірного механізму.

Розбіжність питомих вкладів окремих перетинів у надійність рами в цілому досягає в середньому 10% і наближається до питомих вкладів окремих основних механізмів руйнування.

ВИСНОВКИ

Дана робота присвячена розвитку імовірнісного розрахунку статично не визначних сталевих рам різного призначення і конфігурації. Розрахунок проведено з урахуванням реальної роботи матеріалу і навантаження. Основні результати роботи полягають у таких пунктах:

1) розроблена методика оцінки надійності статично не визначених систем методом перебору станів. У даному методі використовуються графоаналітичні перетворювання і враховуються пластичні і крихкі відмови елементів;

2) для отримання нижньої оцінки ймовірності відмови конструкції в цілому запропоновано метод розрахунку. Даний метод використовує найбільш імовірний механізм руйнування на основі методу граничної рівноваги;

3) запропонований логіко-імовірнісний метод обчислення імовірності відмови системи, яка враховує всі моделі руйнування конструкції;

4) для визначення ймовірності відмови сталевих статично не визначених систем розроблений імовірнісний метод граничної рівноваги. В обчисленнях ураховується різноманітність форм відмов конструкції і кореляційний зв’язок між механізмами руйнування. Також здійснюється порівняння ймовірності відмови системи з імовірністю відмови одного елементу, запроектованого згідно з нормами.

Розроблено алгоритм оцінки значущості, вкладу і питомого вкладу окремих основних механізмів руйнування і небезпечних перетинів елементів статично не визначних сталевих рам у надійність системи в цілому.

Запропоновано метод визначення коефіцієнту надійності для статично не визначених систем γ_s під час однопараметричного та багатопараметричного навантаження конструкцій. Даний метод ураховує випадкові характеристики міцності і навантаження. Згідно з імовірнісним методом граничної рівноваги розраховані коефіцієнти γ_S до 30-ти рам, що дорівнюють 1.2-1.4. Використання γ_S дасть економію матеріалу 5-20%. У практичних розрахунках сталевих статично не визначених систем рекомендується застосовувати γ_S =1.1.

АНОТАЦІЯ

Мета роботи складається з розроблення методики й імовірнісного розрахунку та оцінки параметрів надійності сталевих статично не визначених рам та рекомендацій до зниження їх матеріалоємності шляхом регулювання запасів несучої здатності елементів.

Розроблено метод оцінки параметрів надійності сталевих статично не визначених рам методом розгляду усіх працездатних становищ. Використано логіко-імовірнісні методи дослідження стохастичних характеристик роботи статично не визначених систем. Отримано методику оцінки імовірності відмови статично не визначених систем на основі методу граничної рівноваги з урахуванням кореляції окремих схем руйнування. Запропоновано метод розрахунку значущості і вкладу окремих елементів рам та їх впливу на ймовірність відмови системи в цілому. Пропонується практичний метод проектування сталевих статично не визначених рам із використанням коефіцієнту надійності сталевих статично не визначених конструкцій γ_s. Наукова новизна роботи полягає в розробленні схеми визначення ймовірності відмови рам методом оцінки робочої ємності. Зокрема, розглядаються крихкі і пластичні відмови перерізи рами. Виявлені алгоритми розрахунку ймовірності відмови сталевих рам імовірнісним методом граничної рівноваги. Визначені показники значущості окремих елементів сталевих рам. Представлений чисельний експеримент з розробленими програмами на ПЕОМ для оцінки ймовірності відмови сталевих рам різних

перерізів. Запропонований до використання коефіцієнт надійності сталевих статично не визначених конструкцій γ_s.

Практичне значення роботи складається з більш повного врахування реальної роботи конструкцій і ймовірнісної природи міцності та навантаження, застосування коефіцієнту надійності. Виявлені можливості отримання більш економічних рам під час проектування нових, а також реконструкції існуючих будівель та споруд. На основі запропонованої методики складені алгоритми і розроблені програми на ПЕОМ для ймовірнісного розрахунку сталевих статично не визначених рам різноманітного призначення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cheng Y.M., Li D.Z., Li L., Sun Y.J., Baker R.,Yang Y. Chapter 4 – System-Level “Limit equilibrium method based on an approximate lower bound method with a variable factor of safety that can consider residual strength”. *Computers and Geotechnics*. 2011. Vol. 38. No. 5. P. 623–637. DOI:10.1016/j.compgeo.2011.02.010.
2. Huang G., Chen X., Yang Zh., Wu B. Exact analysis and reanalysis methods for structures with nonlinear boundary conditions. *Computers & Structures*. 2018. Vol. 198. P. 12-22. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.01.004.
3. Wang J. Chapter 4 – System-Level “Fail-Safe”. *Safety Theory and Control Technology of High-Speed Train Operation*. 2018. P. 125–144. DOI: 10.1016/B978-0-12-813304-0.00004-9.
4. Tabbuso P., M.J. Spence S., Palizzolo L., Pirrotta A., Kareem A. An efficient framework for the elasto-plastic reliability assessment of uncertain wind excited systems, *Structural Safety*. 2016. Vol. 58. P. 69–78. DOI: 10.1016/j.strusafe.2015.09.001.
5. Zhang H., R. Ellingwood B., J.R. Rasmussen K. System reliabilities in steel structural frame design by inelastic analysis, *Engineering Structures*. 2014. Vol.58. P. 341–348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.003.
6. Najafi L.H., Tehranizadeh M. Equation for achieving efficient length of link-beams in eccentrically braced frames and its reliability validation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 130. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.11.020.
7. Park J., Kim J. Fragility analysis of steel moment frames with various seismic connections subjected to sudden loss of a column. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. No. 6. P. 1547–1555. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.02.003.
8. Zacharenaki A. E., Fragiadakis M., Papadrakakis M. Reliability-based optimum seismic design of structures using simplified

performance estimation methods, Engineering Structures. 2013. Vol. 52, P. 707–717. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.03.007.

9. Lin S.C., Kam T.Y. Buckling failure probability of imperfect elastic frames". *Computers & Structures*, 1992. Vol. 44. No. 3. P. 515–524. DOI: 10.1016/0045-7949(92)90384.

10. W. Liu, J.R. Rasmussen K., Zhang H. Systems Reliability for 3D Steel Frames Subject to Gravity Loads. *Structures*. 2016. Vol. 8. P. 170–182. DOI: 10.1016/j.istruc.2016.06.002.

11. Le Linh A., Bui-Vinh T., Ho-Huu V., Nguyen-Thoi T. An efficient coupled numerical method for reliability-based design optimization of steel frames, *Journal of Constructional Steel Research.* 2017. Vol. 138. P. 389–400. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.08.002.

12. Thai H.-T., Uy Br., Kang W.-H., Hicks S. System reliability evaluation of steel frames with semi-rigid connections, *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol.121. P. 29–39. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.01.009.

13. Taras A., Huemer St., On the influence of the load sequence on the structural reliability of steel members and frames, *Structures.* 2015. Vol. 4. P. 91–104. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.10.007.

14. Fan W., Yang P., Ang A. H-S., Li Z. Analysis of complex system reliability with correlated random vectors. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016. Vol. 45. P. 61–69. DOI: 10.1016/j.probengmech.2016.03.004.

15. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. *Technical University of Denmark maritime engineering*. 2003. 323 p.

Information about authors:
Chichulina K. V.,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Economics,
Enterpreneurship and Marketing
National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"
24, Pershotravneviy, Poltava, 36011, Ukraine

Chichulin V. P.,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Metal,
Wood and Plastic Constructions
National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"
24, Pershotravneviy, Poltava, 36011, Ukraine

DOI https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.23

PROVIDING ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE CONDITIONS OF THE DENSE ROAD NETWORK

Sheludchenko L. S., Semenyshena R. V.

INTRODUCTION

In the Montreal Declaration "People's Right to Safety" (Montreal, Canada, May 15, 2002) the term "safety" is defined as a state in which hazards and conditions leading to physical, psychological or material harm are controlled in order to preserve the health and well being of individuals and the community. That is, the aim is to continuously monitor and develop risk control mechanisms on a continuous basis. However, it should be noted that safety is the result of a complex process where humans interact with their environment, including the physical, social, cultural, technological, political, economic and organizational environments.

The concept of safety is relative, as is its achievement. After all, it will always carry a certain probability, which depends on the characteristics of the object, its complexity, internal relationships and environment. One of the main criteria for safety is the absence of negative dynamics in the development of the system. Practically, safety is a feature of the object to provide no risk. It is a condition in which the risk of injury or damage is reduced to an acceptable level, which is achieved through a set of developed protection systems.

In general, the economic activity of society is characterized by the active use of natural resources, where benefits and dangers are manifested. It doesn't take into account the main environmental priorities, the essence of which is to preserve the quality of environmental objects. However, the abandonment of nature management can also lead to the risk of lost opportunities. Thus, the lack of available resources will lead to a decline in socio-economic development.

Thus, we emphasize that in order to achieve a risk acceptable to society, it is necessary to find an appropriate balance between economic activity and the level of risk that is created by its functioning.

It should be noted that any activity, and in particular transport infrastructure, entails a certain risk. Its task is not only to anticipate the benefits expected, but also to take into account the potential harm to both human health and the environment. The ability to realize the degree of the risks not only assesses all the dangers, but also requires responsibility for ensuring an appropriate level of safety, including environmental.

Turning potential danger into reality does not lead to an actual disaster, but only turns into a safety risk. Its implementation is carried out only with direct contact with the danger. And this requires at least three conditions:

1) the danger actually works;
2) the object is in the danger zone;
3) the object does not have sufficient protection.

That is why the substantiation of the developments on the ecologically safe functioning of the road network is an urgent scientific and practical problem.

1. Analysis of environmental hazards related to the road network functioning

Ukraine's highways are an important link in the country's overall transport system and an important factor in the development of the national economy. In Ukraine most of the roads of international and national importance pass through settlements. Such placement does not meet the requirements for international transport corridors. After all it leads to a restriction of the speed of road transport, which is 2-3 times lower on the roads of Ukraine, than in Western European countries. It should be noted that the development of motorways in general is far behind the pace of motorization of the country. This causes a number of common problems. For example: increase of traffic load on highways, exceedance of permissible load, non-compliance with operational requirements, violation of ecological capacity of territories, pollution of roadside territories with pollutants contained in automobile emissions. To improve the current situation in the concept of creating and operating a national network of international transport corridors in Ukraine, it is envisaged "… to significantly reduce the negative impact of motor transport on the surrounding territories. This will be achieved through the creation of appropriate environmental conditions on motorways "(quote).

In general, in accordance with the Building Code of Ukraine and the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of August 28, 2013 No. 808 "On approval of the list of activities and objects of increased

environmental hazard", motorways and individual highway infrastructure is classified as an environmental hazard. Therefore, ensuring a sufficient level of environmental safety in the area of influence of the road network should be carried out by a systematic approach to the development of solutions for the safe development of the motor transport complex within specific territorial conditions[1]

This approach will allow not only the economic and transport feasibility but also the environmental component of the project. Its aim is to strive for sustainable economic development of the country and preserving the environment.

2. Analysis of structural features of forest gas-dust lane roads

A significant factor in the impact of traffic flows on natural-techno-geo-ecosystems (NTGEs) is the spread of pollutants. The main of them are the carbon dioxide and carbon monoxide, nitrogen oxides, hydrocarbons, aldehydes, mineral dust, heavy metals, etc. They have a significant impact on the environment and human health.[2] Migration and accumulation of pollutants within the NTGEs are due to a number of interrelated factors: weather and climatic conditions, landscape features, eochemical activity of the territory, the presence of protective barriers (including artificially created ones), etc.

One of the types of artificially created protective structures is woodland shrubs. According to the current building codes, they are multifunctional and perform anti-erosion, decorative functions, prevent snow and sand travel of the roadway.

---

[1] Шмандій В.М., Шелудченко Л.С. До питання забезпечення екологічної безпеки територій з розвиненою інфраструктурою автодорожньої мережі. *Збірник наукових праць VII-й Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю.* Вінниця: ВНТУ, 2019. С.26; 2 Шелудченко Л.С., Замойський С.М. Управління екологічною безпекою в умовах функціонування автодорожньої мережі. *Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки».* Кременчук: КрНУ, 2019. С. 92–96.

[2] Внукова Н.В. Вплив автомобільних доріг на екобезпеку комплексу «автомобіль-дорога-середовище». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 5 (3(53)),* 2011. С. 43–46; Гриценко А.В., Соловей В.В., Внукова Н.В. Ризики техногенно-екологічного характеру при експлуатації об'єктів автотранспортної інфраструктури. *Экология и промышленность*, 3,2011. С. 37–40.; Внукова Н.В., Желновач Г.М. Вибір екологічно значимих параметрів автотранспортних систем для оцінки екологічної небезпеки придорожнього простору. *Науковий журнал «Екологічна безпека»* . Кременчук: КрНУ, 2011. № 2/2011 (12). С. 119–123.

Such multifunctionality of typical structures of forest strips cannot fully ensure the environmentally safe conditions for the functioning of the road network. Similarly, it is not capable of providing reliable protection against mineral dust pollutants produced by road traffic. Important is the development of engineering solutions concerning an urgent scientific and practical task. They relate to the design of forest gas-dust lane structures that will limit the environmental impact of vehicles and provide sufficient environmental protection with a developed road network. But there should be taken into account such factors as: highway category, traffic flow intensity, and weather and landscape features of the territory.

The traditional shape of the transverse profile of a protective forest lane of a highway (in accordance with BRM (Branch Road Methodology) 218.011-98) has the form of a triangle with a more oblique side, turned to the source of emissions, that is, to the carriageway (Fig. 1).

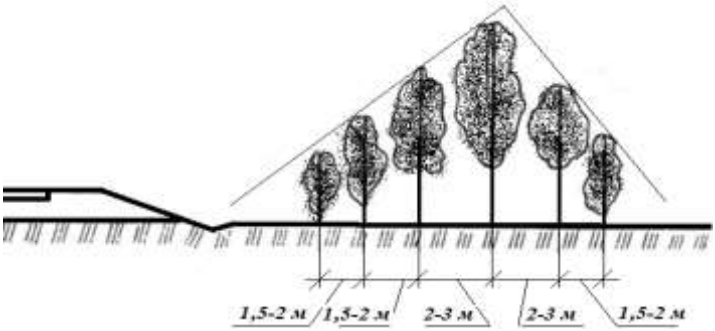


Fig. 1. Cross-section profile of the protective forest belt
The scheme of planting trees and shrubs in the strip is (from left to right):
1st row from the road – low shrub; 2nd row – high shrub;
3rd row – accompanying tree species; 4th row – the main tree species;
5th row – accompanying tree species; 6th row – tall shrub

It should be noted that the design does not provide sufficient protection of the outlying territories from gas and dust emissions in accordance with the determined intensity of traffic flows, which takes into account the category of highway.

The more efficient design of the protective forest strips is the developed variants of the construction of the forest gas-dust-protective strips of the insulating type in the form of artificial linear bilateral

barriers. These constructions were developed on the basis of fractal-invariant features of the NTGEs landscape, the intensity of traffic flows, and the motor transport capacity of the territory in accordance with the category of roads. Fractal-invariant models of such forest gas-dust lane roads for categories 1a, 1b, 2, 3, 4, 5 of motor roads are shown in Fig. 2. The structure of the protective forest belt is formed by the in-line shrubs and timber planting with corresponding ecological-landscape, functional and morphological properties. At the same time, the above structures of forest gas-dust strips are exclusively part of the engineering infrastructure of the automobile-communication complex.[3]

The structure of the wood-shrub landing of the forest gas-dust protection strip determines the cross-section profile of its structure (hereinafter - the typical structure) in the form of a trapezoid with the angles of lateral sides from the vertical: avers α ~ 20O and reverse β ~ 30O-50O and height (Fig. 3). The width a of the typical protective forest strip (the lower base of the trapezoidal profile) shall be: for motorways of categories 1a and 1b not less than 32 m, categories 2 - ≥24 m, categories 3 - ≥16 m, categories 4 - ≥8 m, categories 5 - ≥4 m.

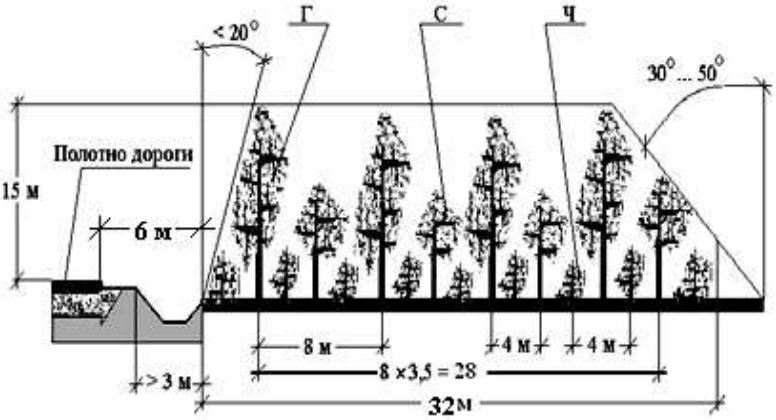
It is established that the insulating (protective) and renewable (relative to the atmospheric air) properties of typical structures of forest gas-dust protection strips depend on the structural parameters of the strip and its openness. It varies depending on the season, weather and climatic conditions and features of terrain of specific NTGEs.

At the same time, the value of the complex indicator of atmospheric air AQI (Air quality index), (for such ingredients as CO, NOx, SO2) on the reverse side of the strip decreases by ~ 10.7 times compared to the similar value on its averse side (in the absence of a protective forest belt only ~ 1.6 times), and the indicator $\sum \frac{C_i}{\text{ГДК}_\text{i}} \ll 1$ (C_i – is the concentration of the relevant pollutant ingredient, and TLV (threshold limit value) is the corresponding value of the maximum permissible pollutant concentration).[4]

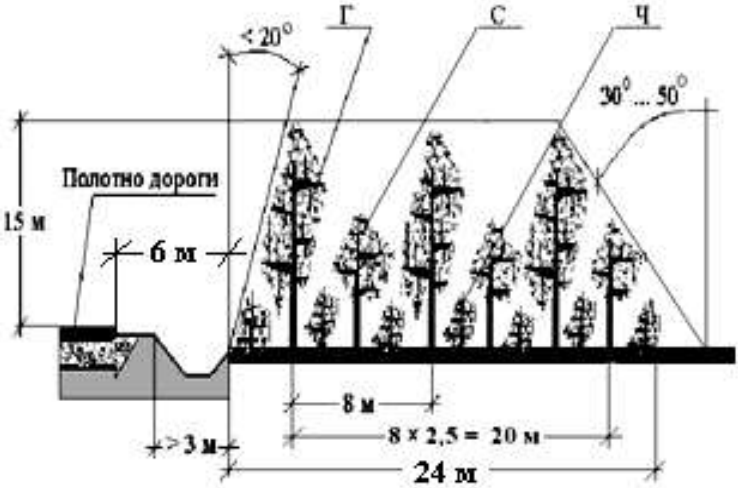
---

[3] Шелудченко Л.С. Розроблення конструкцій газо-пилозахисних лісосмуг автодорожньої мережі. Кам'янець-Подільський : В-во ПДАТУ, 2015. 134 с.

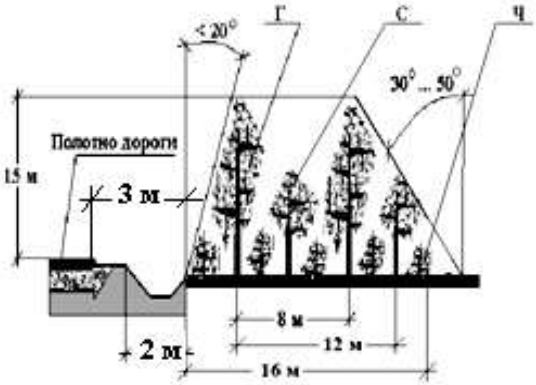
[4] Патент України №56323, МПК E01F15/00 Лісова газо-пилозахисна смуга автомобільної дороги / Л.С. Васик, М.І. Бахмат, Б.А. Шелудченко, О.М. Бахмат, І.А. Шелудченко (Україна). –u201007589; заявлено 10.06.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.; Шелудченко Л.С. Екологічна безпека ландшафтів природно-територіальних комплексів, які трансформовано автотранспортними мережами. *Науковий журнал "Екологічна безпека"*. Кременчук : КрНУ, 2017 № 2/2017(24). С. 9–13.


< 20°
Г
С
Ч
30° ... 50°
Полотно дороги
15 м
6 м
8 м
4 м
4 м
8 ×3,5 = 28
> 3 м
32м

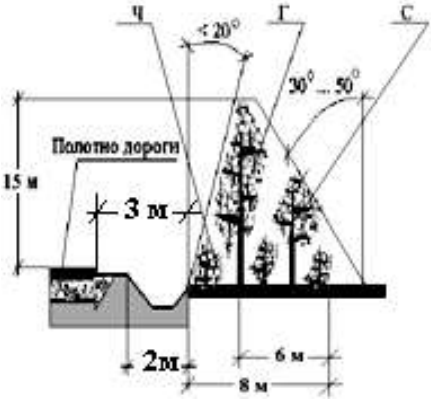
a)


< 20°
Г
С
Ч
30° ... 50°
Полотно дороги
15 м
6 м
8 м
8 × 2,5 = 20 м
> 3 м
24 м

b)



c)



d)

e)

Fig. 2. Fractal-invariant models of forest gas-dust lane strips, depending on the motorway category:

a – categories 1a, 1b; b – category 2; c – category 3; d – category 4; e – category 5; G – the main tree species; C – accompanying tree species; H – shrub

A plan fragment of planting trees and shrubs of a typical construction of the forest gas-dust lane of the highway for categories 1a, 1b is shown in Fig. 4. However, it should be noted that adhering to the row planting of trees and shrubs, ensuring their level as one of the main conditions, and cenobiotic mosaic structure, which is caused by fractal-invariant

strips, lead to endogenesis and anthropogenic successions, which do phytocenosis of forest strips. Such a feature of the functioning of the forest belt phytocenosis leads to a change in the nature of its protective properties, which is an important problem.[5]

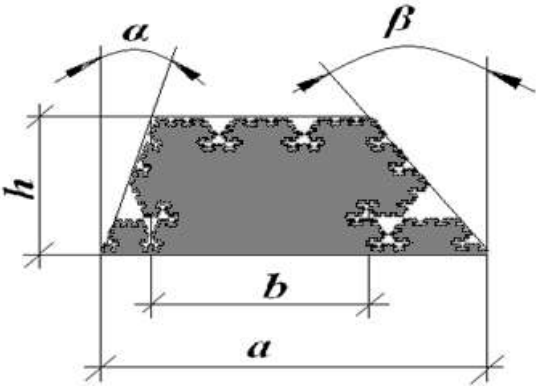


Fig. 3. Geometric parameters of the cross-section profile gas-dust band of wood-shrub type

In addition, we noted that the gas-dusting shrunk lane of a typical highway has high enough characteristics to protect NTGEs from gaseous pollutants (by the ingredients of CO, NOx, SO2) and the oxygen recovery rates of the consumed vehicles. However, the protective (insulating) properties of such a forest belt in relation to dust aerosols are due to its aerodynamic characteristics and are insufficient for reliable protection of NTGEs.

Due to this fact, mineral dust is concentrated in the roadway area. And this significantly worsens not only the working conditions of the drivers, but also the modes of operation of vehicles. Reduction of these negative properties of forest gas-dust-protective strips of a typical design is the construction of a protective forest lane of a highway. It is shown in Fig. 5.

[5] Шелудченко Л.С., Шелудченко Б.А., Вознюк С.В. Аналітичне обґрунтування параметрів лакунарності лісових газо-пилозахисних смуг автомобільних доріг. *Наук.-техн. журнал Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування.* Спец. вип. ІФНТУНГ, Івано-Франківськ, 2014. С. 56–60.

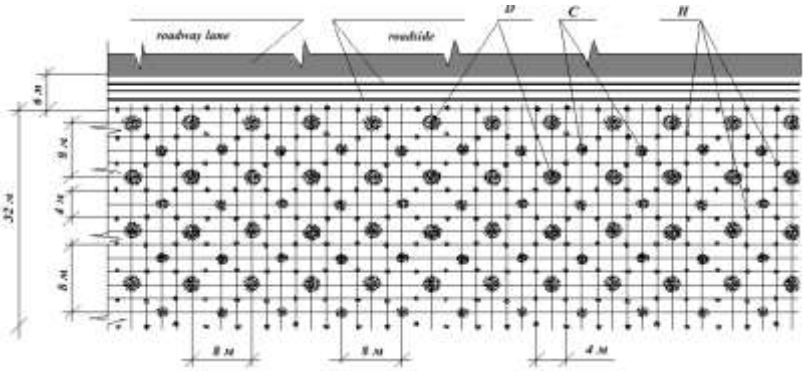


Fig. 4. The scheme of planting trees and shrubs of a typical design of forest gas-dust protection strip of the motorway according to categories 1a, 1b:D is the main tree species, C is the concomitant tree species, H is a shrub

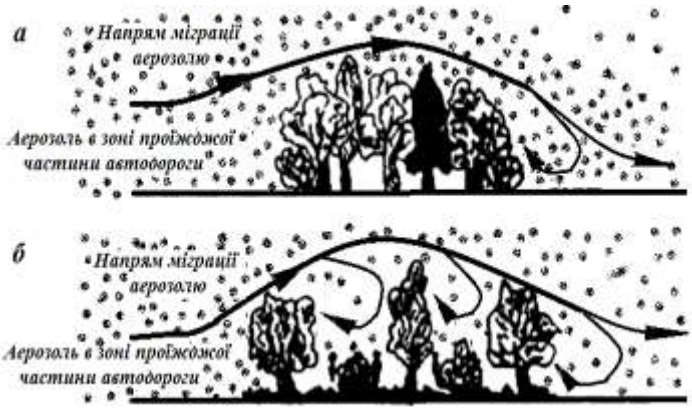


Fig. 5. Derivative design of the protective forest lane of the highway with sparse landing (no accompanying species):

a – typical construction, b – forest belt design with replacement of the accompanying wood species with shrubs

Source: http://www.gosthelp.ru/text/ObzornayainformaciyaAvtom17.html

However, the construction of the forest gas-dust strip, shown in Fig. 5, due to the lineage of planting trees and shrubs, cannot significantly reduce the intensity of migration flows of polluting aerosols. After all the dynamic pressure of the wind flow on the averse

and reverse sides of the forest belt remains practically fixed. Therefore, the conditions for the gravitational deposition of the dispersed phase of the aerosol are absent.

To reduce the dynamic pressure of liquids or gases (aerosols), we applied the design of a labyrinth seal gap between two (or more) combined surfaces, which is most commonly used in engineering structures (Fig. 6).

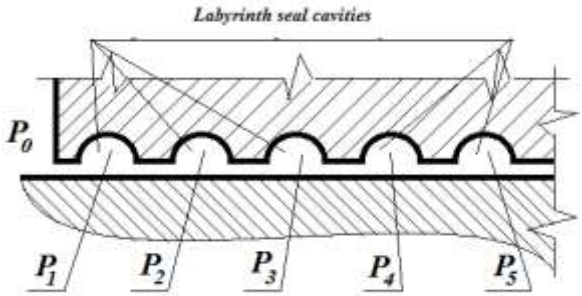


Figure 6. Sketch design of labyrinth seal

The decrease in the output dynamic pressure P0 in the above design of the labyrinth seal is incremental by increasing the working volume of the gap in the cavities (cells) of the maze. That is, P0> P1> P2>…> Pn (Pi is the pressure in the cavities (cells) of the maze, n is the number of cavities of the maze).[6]

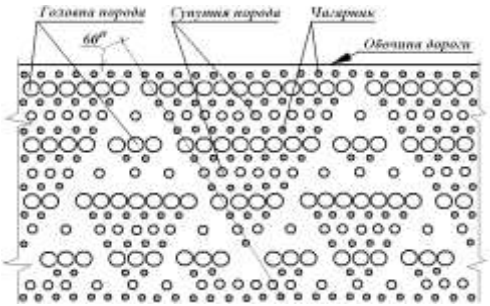
There was developed a hypothesis, which is based on the above analysis of the processes of migration of pollutants in the NTGEs and the structural features of forest gas-dust lane roads. It envisages the creation of artificial lacunar cavities in the structure of the forest gas-dust lane of the highway. This should reduce the aerodynamic pressure of turbulent

[6] Шелудченко Л.С., Поліщук Д.В. Екологічна оцінка шумового забруднення міста, спричиненого діяльністю автотранспортних засобів і стаціонарних джерел. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* № 4(23). Київ : Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, 2018. С. 10–14. DOI:https//doi.org/10.32846/2306-9716-2018-4-23-2; Овчарук О.В., Шелудченко Л.С., Гуцол Т.Д. Экологическая характеристика конструкций газо-пылезащитных лесополос». *European Journal of Intelligent Transportation Systems* 1(1), November 2018/ P. 7-14. DOI: https//doi.org/10.31435/ rsglobal_ejits/30112018/6216.

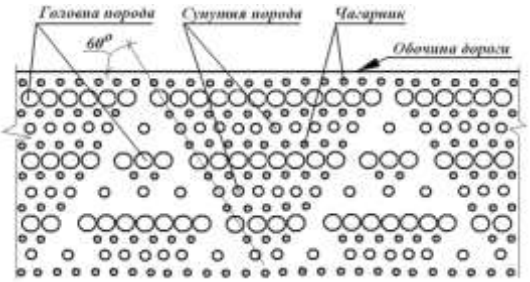
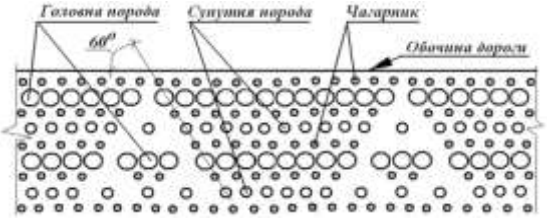
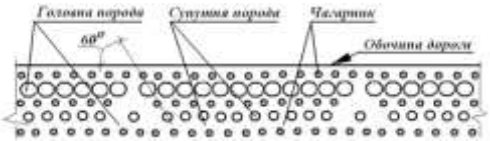
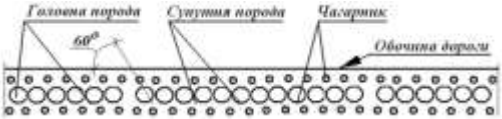
air streams of polluting aerosols. Because it leads to accelerated deposition processes of mineral contaminants within the lacunar cavities (phytocenotic niches) and, as a consequence, to the intensification of deposition of dust pollutants. On the basis of the obtained results, the ecologically rational parameters of artificially created phytocenotic niches (lacunar cavities) in the construction of forest gas-dust lanes of motorways of categories 1a, 1b, 2 and 3 are substantiated, which allows to increase their functional efficiency by indicators. Table 1). Thus, the dispersed particles of dust aerosols with fractions of dispersed particles> 150 μm are completely deposited by the forest belt. And the proportion of undoped dust of smaller fractions (<150 μm) does not exceed 0,12% of the total mass of dust dispersed in the air aerosol and practically does not depend on the season. The volume of migration of heavy metals beyond the limits of the lane of the highway does not exceed ~ 4%. At the same time, the share of oxygen recovered by the massif of shrubs and forests of forest gas-dust protection strip, in the presence of lacunar cavities (phytocenotic niches), is 45 ... 51% in summer and 28 ... 50% in winter.[7]

Table 1

Structure models of forest gas-dust lane for highways of categories 1a, 1b, 2, 3, 4, 5

Category of highway	The design model of forest gas-dust protection strip
Forest gas-dust lane roads of categories I-a, I-b (the rows of planting – 17)	

[7] Sheludchenko L.,Voznyuk S. The results of analytical investigation of aerodynamic properties forest gas-dust proof ing strips with artificially created lacunar cavities. *Scientific journal "Ecological safety"*. Kremenchuk : KrNU, 2016. Number 1/2016(21). P. 81–84.

Forest gas-dust lane roads of category II (the rows of planting – 13)	
Forest gas-dust lane roads of category III (the rows of planting – 9)	
Forest gas-dust lane roads of category IV (the rows of planting – 5)	
Forest gas-dust lane roads of category V (the rows of planting – 3)	

3. Estimation results of deposition intensity of dust pollutants in lacunar cavities of the protective forest belt by the index of carbon black (free carbon) and lead compounds accumulation in soil

Results of indirect estimation of mass distribution and nature of deposition of dust pollutants in artificially created phytocenotic niches according to the cross-section profile (sampling scheme is shown in Fig. 7) of forest gas-dust lane of category 2 highway (in terms of traffic intensity) carbon black (free carbon) are shown in table 2.

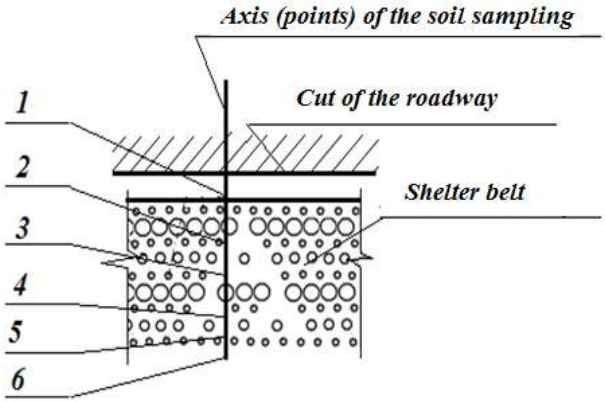


Figure 7. Scheme of soil sampling in the horizontal plane tree-shrub planting of forest gas-dust protection strip in planting rows and in phytocenotic niches

Table 2

Mass distribution of the of deposited carbon by the cross-section profile of the construction of category 3 forest gas-dust lane (average data)

Sampling point number	Weighing bottles number	Carbon content, mg / kg
1	148	26,6
2	249	24,2
3	174	27,2
4	176	31,2
5	167	28,2
6	145	17,6

There was determined the carbon content at individual points of the soil cover of the cross section of the forest gas-dust protection strip. According to the results we determined the topographic nature of the distribution of the deposition of dust emissions (soot) by the transport complex (motor transport stream) by structural features of the shrub planting (Fig. 8).

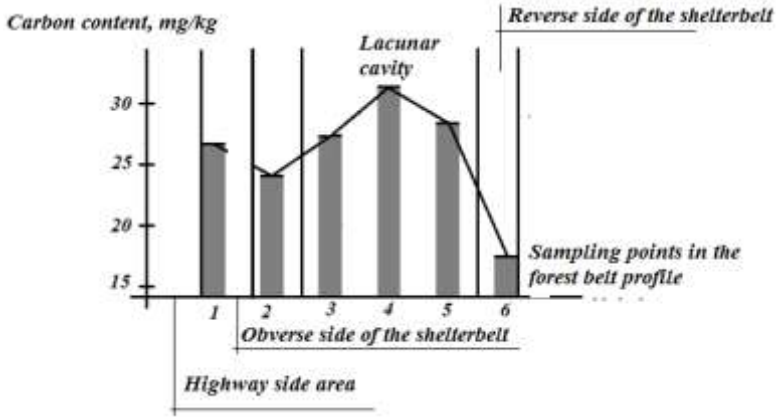


Fig. 8. The nature of the volume distribution and the intensity of the depositdust emissions (by mass of carbon deposited) in the cross-section profile of the forest gas and dust lanes

The nature of the distribution of free carbon (soot) on the profile of the cross section of the forest gas-dustproof strip (for the construction of forest lane category 3) clearly determines the intensification of the process of deposition of dust contaminants of the motor transport complex within the artificially created lacunar. It is established that ~ 17% of the total dust emissions are deposited on the obverse side of the protective forest strip (the area of the roadside of the total width of the highway); and the share of dust emissions in the soil within the lacunar cavity is ~ 57%, whilst the whole -bush planting of the forest belt is deposited only ~ 26%, which is almost 2,2 times less. At the same time, it is determined the level of protection of the roadside territory of the category 3 motorway lane. There should be counted a forest gas-dust band of typical construction with artificially created lacunar cavities (phytocenotic niches), not lower (by the mass distribution of free carbon) by 90 ± 3%.

Similar results, regarding the deposition nature of dust emissions of the motor transport complex by the forest gas-dust lane array for the investigated section of the category 3 highway, were obtained on the results basis of the experimental determination of the heavy metals distribution (for example Pb) in the forest belt soil (Table 3). According to the results of the lead content determination at individual points of the soil cover of the cross section profile in the forest gas-dust protection

strip, there was determined the topographic nature of the distribution of dust emissions (heavy metals) by the motor transport complex according to structural features of the tree (shrubs) planting (Fig. 9).

Table 3

Lead mass distribution by cross-sectional profile of a category 3 forest gas-dust lane (average data)

Sampling point number	weighing bottles number	Lead content, mg / kg
1	148	54,2
2	249	14,7
3	174	39,6
4	176	51,8
5	167	12,4
6	145	7,1

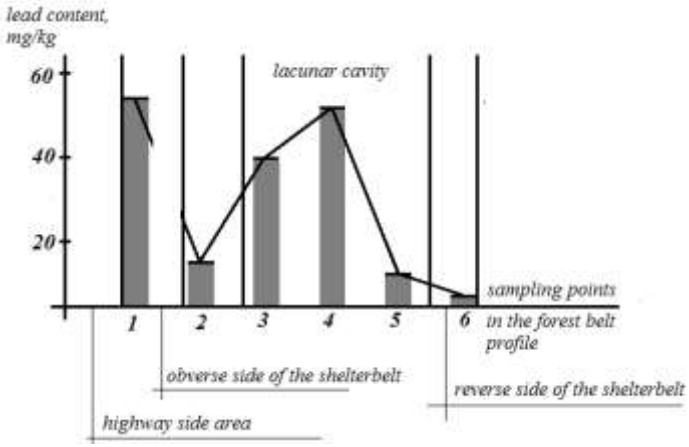


Fig. 9. The nature of the volume distribution and the intensity of the deposit dust emissions (by mass of lead deposited) in the cross-section profile of the forest gas and dust lanes

It is established that a sufficiently large proportion (~ 30%) of total lead emissions is deposited in the roadside of the highway adjacent to the obverse side of the forest gas-dust lane. Therefore, to analyze the nature of heavy metals distribution in the wood-shrub massif for 100% of total emissions is the total amount of lead compounds detected in soil samples taken at sampling points (Fig. 7) – 2, 3, 6.

The analysis results of the specific content of lead compounds in the soil profile of the cross section of the protective forest belt (by the nature of the particle distribution from the total emissions of motor traffic) are largely identical to the results in the distribution of dust pollutants in the soil by the coal content.

Thus, in the lacunar zone is concentrated ~ 83% of total lead compounds. They are deposited within the shrubs of the gas-dust-protective forest belt (58% of total emissions). In this case, the experimentally determined share of dust emissions (by lead compounds) on the reverse side of the shelterbelt does not exceed ~ 4%. It determines the level of protection of the adjacent territory of the category 3 highway, in the presence of a forest gas-dust lane of a typical structure with artificially created lacunar cavities (phytocenotic niches), not worse than 96 ± 3%.[8]

Thus, it is experimentally proved that artificially created lacunar cavities (phytocenotic niches) in arrays of wood-shrubs plantations of forest gas-dust lane of highways provide higher levels of protection for the areas adjacent to the highway strip from dust emissions produced by traffic flows. It is established that up to 60% of the total dust emissions are deposited in the area of the lacunar cavities of the forest belt. The forest band gradient varies from 90 to 96 ± 3% in terms of the dispersed phase concentration in the air streams of dust aerosols.

CONCLUSIONS

This work focuses on solving the current scientific and practical problem of developing a protection system of roadside landscapes from the adverse effects of pollutants, which are the source of vehicle flows.

To ensure a sufficient level of ecological safety of the territory, there have been developed structures of gas-dust protective strips of wood-shrub type. Their parameters considered all the necessary factors: the category of the highway, the intensity of the traffic flow, the climatic and landscape features of the territory.

One of the most effective measures for maintaining the ecological balance of natural-technogenic geo-ecosystems with a developed road

---

[8] Ivanyshyn V., Sheludchenko L., Hutsol T., Rud A., Skorobogatov D. Mass transfer management and deposition of contaminants within car road zones. *Environment. Technology. Resources.* Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference / Volume 1. Rezekne Academy of Technologies, (2019). P. 70–74.; Шелудченко Л.*С.* Функціональні ознаки автотранспортного комплексу. *«Автомобіль і електроніка сучасні технології» Електронне наукове фахове видання,* 13/2018, ХНАДУ, Харків, 2018. С. 75–80. DOI: 10.30977/VEIT.2018.13.0.75.

transport network is the creation of artificial linear-double-sided geochemical barriers in the form of forest gas-dust-protective strips of tree-shrub type. Their planting structure includes a maze phytocoenotic niches (artificially created lacunar cavities) to limit the migration of dust mineral contaminants beyond the confines of the highway.

It has been determined that the level of deposition of dust mineral contaminants produced by motor transport streams, forest gas-dusty strips of woody-shrub type with artificially created labyrinth of cavities is not less than 66% in the winter period and reaches 99% in the summer. In this case, the dispersed particles of dust pollutants with fractions> 150 μm are completely deposited in the forest belt. The fraction of non-deposited dust of smaller fractions (<15 μm) does not exceed 0.12% of the total mass of dust dispersed in the air aerosol and is practically independent of the season.

It is established that the dust-protective properties of forest gas-dust-lane roads, including lacunar cavities in their structure, increase from 66-72% for the construction of the forest lane of category 3 to 99% for the construction of forest lane categories 1a, 1b. In this case, the increase in the gradient of *I* forest strips from 0.03 to 0.24 (in summer) and from 0.03 to 0.31 (in winter) with increasing number of phytocenotic niches in the structure of tree-shrub planting of the strip from 3 to 6 indicates their functional effectiveness in protecting the roadside landscapes from dust emissions from traffic flows.

SUMMARY

In the dissertation have been established that an effective measure for implementation ecological safety of natural-technogenic geoecosystem with a developed road network is the creation of an artificial linearly-bilateral geochemical barriers in the form of a forest gas-dustproofing strips of wood-shrub type, which in structure is provided the maze of phytocenotic niches (artificially created lacunar cavities). Has proved ecological and landscape characteristics of structures lacunar cavities, signs of which should be fractal-invariant to all forest strip and causing the filtering of dust aerosols produced by traffic flows, that ensures intensification the deposition processes of mineral contaminants by massif of the protective forest strip within the abduction's strip of the highway (by an indicator of mass the dispersed phase aerosol) > 66% in winter and 99% in summer. Designed a number of structures forest gas-dustproofing strips with the maze of lacunar cavities by road categories 1a, 1b, 2 and 3 provide increase their dustproofing properties on indicators of functional efficiency is ~ 70% for construction of the road's

strip by category 3, ~ 98% by category 2 and by category 1a and 1b > 99% (by weight of dust pollutants).

REFERENCES

1. Шмандій В.М., Шелудченко Л.С., До питання забезпечення екологічної безпеки територій з розвиненою інфраструктурою автодорожньої мережі. *Збірник наукових праць VII-й Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю.* Вінниця : ВНТУ, 2019. С. 26.

2. Шелудченко Л.С., Замойський *С.М.* Управління екологічною безпекою в умовах функціонування автодорожньої мережі. *Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки».* Кременчук : КрНУ, 2019. С. 92–96.

3. Внукова Н.В. Вплив автомобільних доріг на екобезпеку комплексу «автомобіль-дорога-середовище». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 5 (3(53)),* 2011. С. 43–46.

4. Гриценко А.В., Соловей В.В., Внукова Н.В. Ризики техногенно-екологічного характеру при експлуатації об'єктів автотранспортної інфраструктури. *Экология и промышленность*. 3. 2011. С. 37–40.

5. Внукова Н.В., Желновач Г.М. Вибір екологічно значимих параметрів автотранспортних систем для оцінки екологічної небезпеки придорожнього простору. *Науковий журнал «Екологічна безпека»* . Кременчук : КрНУ, 2011 № 2/2011(12). С. 119–123.

6. Шелудченко Л.С. Розроблення конструкцій газо-пилозахисних лісосмуг автодорожньої мережі. Кам'янець-Подільський : В-во ПДАТУ, 2015. 134 с.

7. Патент України № 56323, МПК E01F15/00 Лісова газо-пилозахисна смуга автомобільної дороги / Л.С. Васик, М.І. Бахмат, Б.А. Шелудченко, О.М. Бахмат, І.А. Шелудченко (Україна). u201007589; заявлено 10.06.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. №1.

8. Шелудченко Л.С. Екологічна безпека ландшафтів природно-територіальних комплексів, які трансформовано автотранспортними мережами. *Науковий журнал «Екологічна безпека»*. Кременчук : КрНУ, 2017 № 2/2017(24). С. 9–13.

9. Шелудченко Л.С., Шелудченко Б.А., Вознюк С.В. Аналітичне обґрунтування параметрів лакунарності лісових газо-пилозахисних смуг автомобільних доріг. *Наук.-техн. журнал «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування».* Спец. вип. ІФНТУНГ, Івано-Франківськ, 2014. С. 56–60.

10. Шелудченко Л.С., Поліщук Д.В. Екологічна оцінка шумового забруднення міста, спричиненого діяльністю автотранспортних засобів і стаціонарних джерел. *Екологічні науки: науково-*

практичний журнал № 4 (23). Київ : Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, 2018. С. 10–14. DOI : https//doi.org/10.32846/2306-9716-2018-4-23-2.

11. Овчарук О.В., Шелудченко Л.С., Гуцол Т.Д. Экологическая характеристика конструкций газо-пылезащитных лесополос автомобильных дорог». *European Journal of Intelligent Transportation Systems* 1(1), November 2018/ P. 7–14. DOI : https//doi.org/10.31435/rsglobal_ejits/30112018/6216.

12. Sheludchenko L., Voznyuk S. The results of analytical investigation of aerodynamic properties forest gas-dustproofings trips with artificially created lacunar cavities. *Scientific journal "Ecological safety"*. Kremenchuk : KrNU, 2016. Number 1/2016(21). P. 81–84

13. Ivanyshyn V., Sheludchenko L., Hutsol T., Rud A., Skorobogatov D. Mass transfer management and deposition of contaminants within car road zones. *Environment. Technology. Resources.* Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference / Volume 1. Rezekne Academy of Technologies, (2019). P. 70–74.

14. Шелудченко Л.*С.* Функціональні ознаки автотранспортного комплексу. *«Автомобіль і електроніка сучасні технології» Електронне наукове фахове видання,* 13/2018, ХНАДУ, Харків, 2018. С. 75–80. DOI: 10.30977/VEIT.2018.13.0.75.

Information about authors:
Sheludchenko L. S.,
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Department of Transport Technologies
State Agrarian and Engineering University in Podilia
13, Shevchenko St., Kamyanets-Podilsky,
Khmelnytsky region, 32300, Ukraine

Semenyshena R. V.,
Candidate of Pedagogical Sciences,
Assistant of the Department of General Technical Disciplines
State Agrarian and Engineering University in Podilia
13, Shevchenko St., Kamyanets-Podilsky,
Khmelnytsky region, 32300, Ukraine

NOTES

NOTES

The project was implemented with the support of

CENTER
for Ukrainian and European
Scientific Cooperation

The Center for Ukrainian and European Scientific Cooperation is a non-governmental organization, which was established in 2010 with a view to ensuring the development of international science and education in Ukraine by organizing different scientific events for Ukrainian academic community.

The priority guidelines of the Center for Ukrainian and European Scientific Cooperation

1. International scientific events in the EU

Assistance to Ukrainian scientists in participating in international scientific events that take place within the territory of the EU countries, in particular, participation in academic conferences and internships, elaboration of collective monographs.

2. Scientific analytical research

Implementation of scientific analytical research aimed at studying best practices of higher education establishments, research institutions, and subjects of public administration in the sphere of education and science of the EU countries towards the organization of educational process and scientific activities, as well as the state certification of academic staff.

3. International institutions study visits

The organisation of institutional visits for domestic students, postgraduates, young lecturers and scientists to international and European institutes, government authorities of the European Union countries.

4. International scientific events in Ukraine with the involvement of EU speakers

The organisation of academic conferences, trainings, workshops, and round tables in picturesque Ukrainian cities for domestic scholars with the involvement of leading scholars, coaches, government leaders of domestic and neighbouring EU countries as main speakers.

Contacts:
Head Office of the Center for Ukrainian and European Scientific Cooperation:
88017, Uzhhorod, 7, Malovnycha Str., Office 2
+38 (066) 421 55 76
info@cuesc.org.ua

www.cuesc.org.ua

MODERN ENGINEERING RESEARCH:
TOPICAL PROBLEMS, CHALLENGES AND MODERNITY

Collective monograph

Izdevniecība “Baltija Publishing”
Valdeķu iela 62 – 156, Rīga, LV-1058

Iespiests tipogrāfijā SIA “Izdevniecība “Baltija Publishing”
Parakstīts iespiešanai: 2020. gada 18. maijs
Tirāža 150 eks.