

Видається з 1996 року

Засновник і видавець
Сумський національний аграрний
університет

Реєстраційне свідоцтво
КВ № 23691-13531 Р від 21.11.2018 р.

Міністерство освіти і науки України

ВІСНИК СУМСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО АГРАРНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 4 рази на рік.

Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»
Випуск 3 (49), 2022

ЗМІСТ

Редакційна колегія серії Зубко В.М. , доктор технічних наук, головний редактор, Сумський національний аграрний університет (Україна) Тарельник В.Б. , доктор технічних наук, професор, заступник головного редактора, Сумський національний аграрний університет (Україна) Думанчук М.Ю. , кандидат технічних наук, відповідальний секретар, Сумський національний аграрний університет (Україна) Антошевський Богдан , доктор технічних наук, Кельцький технологічний університет (Польща) Кундера Чеслав , доктор технічних наук, професор, Кельцький технологічний університет (Польща) Кирик Г.В. , доктор технічних наук, Сумський національний аграрний університет (Україна) Лобода В.Б. , кандидат фізико-математичних наук, Сумський національний аграрний університет (Україна) Коноплянченко С.В. , кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) Галюнова О.П. , доктор технічних наук, професор, Сумський державний університет (Україна) Хінек Рубік , кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія) Девід Херак , кандидат технічних наук, Чеський університет наук про життя (Чехія) Шуляк М.Л. , доктор технічних наук, професор, Сумський національний аграрний університет (Україна) Харченко С. О. , доктор технічних наук, професор, Полтавський державний аграрний університет (Україна) Лебедєв А.Т. , доктор технічних наук, професор, Сумський національний аграрний університет (Україна) Соларьов О.О. , кандидат технічних наук, Сумський національний аграрний університет (Україна) Роговський І.Л. , доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України (Україна) Оничко В. І. , кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) Мельник А. В. , доктор сільськогосподарських наук, Сумський національний аграрний університет (Україна) Троценко В. І. , доктор сільськогосподарських наук, професор, Сумський національний аграрний університет (Україна) Перцевой Ф. В. , доктор технічних наук, професор, Сумський національний аграрний університет (Україна) Сабадаш С.М. , кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) Мазуренко І. К. , доктор технічних наук, старший науковий співробітник, академік Академії вищої освіти України, Сумський національний аграрний університет (Україна) Сильчук Т.А. , доктор технічних наук, професор, Національний університет харчових технологій (Україна) Мельник О.Ю. , кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) Бо Лі , доктор філософії, професор, Хенанський інженерно-дослідний центр переробки фруктів і овочів та контролю безпеки якості Хенанського науково-технічного інституту (Китай) Паван Кумар , доктор філософії (тваринництво) Науковий університет, Університет ветеринарії та тваринництва Гуру Ангада Дев (Мапайзія) Бондаренко Ю.В. , кандидат технічних наук, Національний університет харчових технологій (Україна) Самілик М.М. , кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет (Україна) Назаренко Ю.В. , кандидат технічних наук, Сумського національного аграрного університету (Україна) Дубова Г.Є. , кандидат технічних наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет (Україна)	Wang Xinfa, Zubko V., Onychko V., Zhao Mingfu Illumination screening and uniformity simulation of hydroponic lettuce in artificial light plant factory..... 3 Xin Du Research on wear resistance of carbonized 45 steel by electro-spark deposition technology..... 11 Бернацький А. В., Курило В. А., Сучек О. М., Сіора О. В., Соколовський М. В., Шамсутдінова Н. О. Розробка технологічної головки для лазерного наплавлення сільськогосподарської техніки..... 19 Горовий С. О., Головченко Г. С. Динамічні випробування роторів насосів циліндричної та дискової конфігурації в шпаринних ущільненнях..... 27 Коваленко Ю. С., Шелест М. С., Рапута В. В., Панкова О. В., Щербина Т. В., Зубко В. М. Мобільний прилад для вимірювання викидів двоокису вуглецю з ґрунту 33 Мирончук В. Г., Самілик М. М., Назаренко Ю. В., Сабадаш С. М. Рекомендації промисловості щодо раціонального ведення процесу кристалізації сахарози охолодженням..... 39 Мороз М. М., Шраменко Н. Ю., Мороз О. В., Соларьов О. О. Транспортно-експедиційне обслуговування при перевезенні міських дрібнопартионних вантажів..... 45 Петрова О. І., Болгова Н. В., Губа С. О., Соколенко В. В., Доденко А. В. Наукове обґрунтування використання насіння маку при виробництві сирків кисломолочних..... 51 Пуховський Є. С., Фролов В. К., Приходько В. П., Бецо Ю. М. Технологічні проблеми виготовлення корпусних деталей хімічних машин та апаратів..... 58 Рижкова Т. М., Самілик М. М., Болгова Н. В., Губа С. О., Соколенко В. В. Удосконалення технології сиркових мас із використанням порошку калини..... 69 Соларьов О. О., Саржанов О. А. Особливості організації дорожнього руху перехрестям міста..... 75
--	--



Видавничий дім
«Гельветика»
2022

Науковий журнал «Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів» внесений до переліку наукових фахових видань України (категорії «Б») у галузі технічних наук (131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія») на підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 1188 від 24.09.2020 (додаток 5)	Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Власовець В. М., Тарельник Н. В., Зубко В. М., Шуляк М. Л., Кирик Г. В. Новий спосіб підвищення якості поверхонь сталених кілець імпульсних торцевих ущільнень, які підлягають радіаційному опромінюванню.....	82
	Шелест М. С. Сучасні системи проведення інокуляції посівного матеріалу просапних культур	90

Науковий журнал «Вісник
Сумського національного аграрного
університету» індексується в
Міжнародних наукометричних базах
Index Copernicus, ResearchBib

Матеріали журналу знаходяться
у вільному доступі на сайті
<https://snaubulletin.com.ua/index.php/mapp>

Усі статті проходять процедуру
таємного рецензування. До
публікації в журналі не допускаються
матеріали, якщо є достатньо підстав
вважати, що вони є плагіатом.
Відповідальність за точність
наведених даних і цитат
покладається на авторів.
Матеріали друкуються українською
та англійською мовами.
У разі цитування посилання на
«Вісник Сумського національного
аграрного університету» обов'язкове

Друкується згідно з рішенням
вченої ради
Сумського національного
аграрного університету
(Протокол № 7 від 29.11.2022 р.)

Видавництво і друкарня –
Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса,
вул. Інглєзі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934-48-28,
+38 (097) 723-06-08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої
справи ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Тираж 300 пр.
Зам. № 0323/196

© Сумський національний
аграрний університет, 2022

ILLUMINATION SCREENING AND UNIFORMITY SIMULATION OF HYDROPONIC LETTUCE IN ARTIFICIAL LIGHT PLANT FACTORY

Wang Xinfu

PhD student

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine,
Henan Institute of Science and Technology, Henan, China

ORCID: 0000-0002-6293-5624

616858308@qq.com

Zubko Vladyslav

Doctor of Technical Sciences, Professor

Sumy National Agronomy University, Sumy, Ukraine

ORCID: 0000-0002-2426-2772

zubkovladislav@ukr.net

Onychko Viktor

PhD (Agricultural Sciences), Associate Professor

Sumy National Agronomy University, Sumy, Ukraine

ORCID: 0000-0003-0584-319X

onichko@gmail.com

Zhao Mingfu

PhD (Control Science & Engineering), Professor

Henan Institute of Science and Technology, Henan, China

ORCID: 0000-0002-3163-2110

zhaomf@hist.edu.cn

With the development of LED plant lighting technology and its wide application in agricultural production, LED plant grow lights have become the mainstream light source used for plant lighting in plant factories with artificial light (PFALs). Artificial plant light source is different from natural light source, its biggest characteristic in light quality, light intensity, photo period and light form all can be accurately and intelligently regulated, ideally can continue to provide plants with light energy at the lowest cost, guarantee annual production and supply with high quality and efficient agricultural products, for the different living environment of people continue to supply the essential fresh plant products. Illumination and illumination uniformity have a significant impact on plant photosynthesis and growth, and are also the basis of the design of plant lighting system in PFALs. In this paper, taking the lettuce varieties planted in the field as the test materials and experimental objects, we design the illumination gradient test, simulate the illumination uniformity of LED forms with different arrangement by using the computer simulation method, and study the influence of different illumination and LED arrangement forms on the growth and biomass of hydroponic Lettuce in PFALs, so as to provide the best lighting solution for the industrialization and standardized production of lettuce in plant factories. The results of the study showed that: for hydroponic lettuce in PFAL's lighting environment, the illumination uniformity of matrix LED light source is the best. The optimal lighting distance is between about 25cm and 30 cm from the lettuce. A red-blue light mixture ratio of 7:1 is the best light quality ratio for lettuce during seedling stage, and a red-blue light mixture ratio of 6:1 is the best light quality ratio in the growth period. The optimum light intensity is $400 \mu\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$. The best daily illumination time is $16 \text{ h} / \text{d}$, and the illumination time can be appropriately extended to achieve the purpose of harvesting lettuce in advance.

Key words: LED plant light source; light formula; illumination uniformity; hydroponics; plant factory with artificial light; urban agriculture; smart agriculture.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.1>

Introduction. In recent years, the artificial light plant factory (PFAL) (Yang Qichang, 2014; Liu Wenke et al., 2014; He Dongxian, 2018; Kozai, 2019; Kozai et al., 2020; Huebbers et al., 2020) will become the mainstream production mode of urban productive agriculture because the plant growth environment is highly controllable and is not limited by the natural climate, geographical location, land resource and other conditions (Lee, 2018). Moreover, the agricultural products of plant factories have the advantages

of no-pollution, no-pesticide-residue, no-washing ready-to-eat, green-healthy-environmental protection, which are expected and loved by people (Ares, 2021; Huang Lichun, 2019; 2021). The PFAL is the highest form of facility agriculture development that is a new agricultural production mode to develop intensive and efficient modern agriculture, more suitable for the development of industrialized and commercial plant production in urban areas and that has very good development prospects (Orsini et al., 2020).

Light is an energy substance necessary for photosynthesis, growth and development, morphological construction, and material consumption of plants, and the light conditions required by different species of plants at different growth stages vary greatly. Therefore, focusing on the optimal light conditions for a particular plant, including light quality, light intensity, light period, and form of light production, has become a hot spot for research on artificial light plant factories. Light emitting diode (LED) has many advantages, such as low voltage, low consumption, safety, energy saving, easy control, long service life, small and light weight, a wide working environment and so on that has become a common light source used as plant lighting in greenhouses and artificial climate chambers and that has also become the mainstream light source used in PFALs with the rise and development of PFAL (Tsuruyama et al., 2018; Prikupets et al., 2019; Wei et al., 2020; Paucek et al., 2020; Jiang et al., 2020).

In China and many countries around the world, lettuce is widely cultivated in fields and greenhouses and it is very popular because of its crisp-tender-fat leaves, good fresh-eating taste and easy to digest, green health care, high nutritional value. Moreover, it does not require a higher growth environment, easy to survive and grow faster, lush leaves, compact growth, lower plant height, short growth cycle, very suitable for cultivation in PFALs. As the demand for light is different for a particular plant at a certain growth stage, Philips took the lead in proposing the concept of plant light formula, which has played an important role in guiding the design, development and production of plant growth lights. Light formula refers to the light conditions required by a crop at a certain growth stage in a particular growth environment (Wang Mengmeng et al., 2015; Liu Wenke et al., 2017; Maronedze et al., 2018). A light formula usually consists of eight parts in three aspects: (1) the first aspect is light characteristics, which are light quality, light intensity, photoperiod, light source installation location, lamps and LED beads quantity, and light uniformity. (2) environmental factors, that is, other environmental parameters based on light formula, such as temperature, humidity, etc. (3) light effect, such as energy saving effect. All the above factors are interdependent, interactive, intertwined and coupled together. Moreover, coupled with the complex biological mechanism of the plant itself, the study of plant light formula becomes extremely complex.

LED is a cold light source, and the closer it is to the plant, the stronger the illuminance, and the higher the utilization efficiency of light energy (Wang Haiou et al., 2004; Massa et al., 2008; Yang Qichang et al., 2011). Illuminance (E) refers to the size of the luminous flux (φ) received by the light receiving surface of the object in the unit area (S), and the illuminance calculation method is shown in formula (1). The illuminance of LED lamp changes with the change of power supply voltage, which can be measured by spectrophotometer.

$$E = \frac{\varphi}{S} \quad (1)$$

For different plants, different numbers of red and blue LEDs need to be selected for matching and combination, and the required illumination and illumination uniformity should be considered at the same time. Different kinds of plants need different light illumination uniformity (Wu Rengmao et al., 2009; Zhu Zhou et al., 2015). The illumination uniformity (U_0) refers to the ratio of the minimum illuminance (E_{min}) of the light receiving surface to the average illuminance (E_{ave}) within a certain irradiation area, which is calculated as shown in formula (2). The value of illumination uniformity is (0,1), and the closer the value is to 1, the more uniform the light received by lettuce and the better the overall growth.

$$U_0 = E_{min} / E_{ave} \quad (2)$$

The planting process of Hydroponic Lettuce in PFALs is divided into three stages, which are germination stage, seedling stage and growth stage, and its cultivation cycle is generally about 30-50 days. The requirement of light is not high in the budding stage, so light regulation is rarely carried out. The best compound ratio of red and blue light in seedling stage is 7:1, and the best compound ratio in growth stage is 6:1. The best illumination time is 16 hours in the seedling stage and growth stage. Generally, the LED light beads are arranged at equal intervals, and the light of different arrangement modes irradiates the lettuce, the illumination uniformity is also very different, which will affect the overall growth of the lettuce.

With the advancement of the industrialization process of the PFAL and the deepening of its research, improving the automation and accuracy of light environment regulation under the condition of full artificial light and maximizing the efficient growth of plants, which are effective ways to reduce energy consumption and improve the comprehensive utilization of resources (Saito et al., 2020; Yuan Fang et al., 2021). In this study, different LED illuminance and arrangement methods were used, and the illumination gradient experiment and illumination uniformity simulation experiment were designed, using the research methods of comparative experiment and computer simulation, the effects of different illuminance and led arrangement methods on the overall growth of lettuce under the condition of the PFAL were studied, in order to provide a standard illumination scheme for the industrialized production of artificial light plants.

Illumination gradient experiment.

1.1. Experiment site and test material

The laboratory is decorated with fully enclosed thermal insulation materials, the hydroponic room is designed with opaque light, the plant growth is illuminated by LED lamps with controllable red blue and white colors, the environment of the planting room is regulated by cabinet type air conditioning, fresh air system, humidifier and other equipment, which are combined and intelligently controlled by centralized control software, and the air flow of planting layer shelves are regulated by DC shaft fan. The nutrient solution circulating in the hydroponic layer shelves are intelligently regulated by the water and fertilizer integrated system controlled by

the program. The experiment was conducted in staggered time periods from early June 2021 to the end of December 2021. Several lettuce varieties were used in the experiment. All lettuce seeds were purchased from formal seed industry

companies and obtained market permission. All the test materials were taken from lettuce hydroponically cultured by laboratory personnel. The experimental site and some main experimental equipment are shown in Fig. 1.

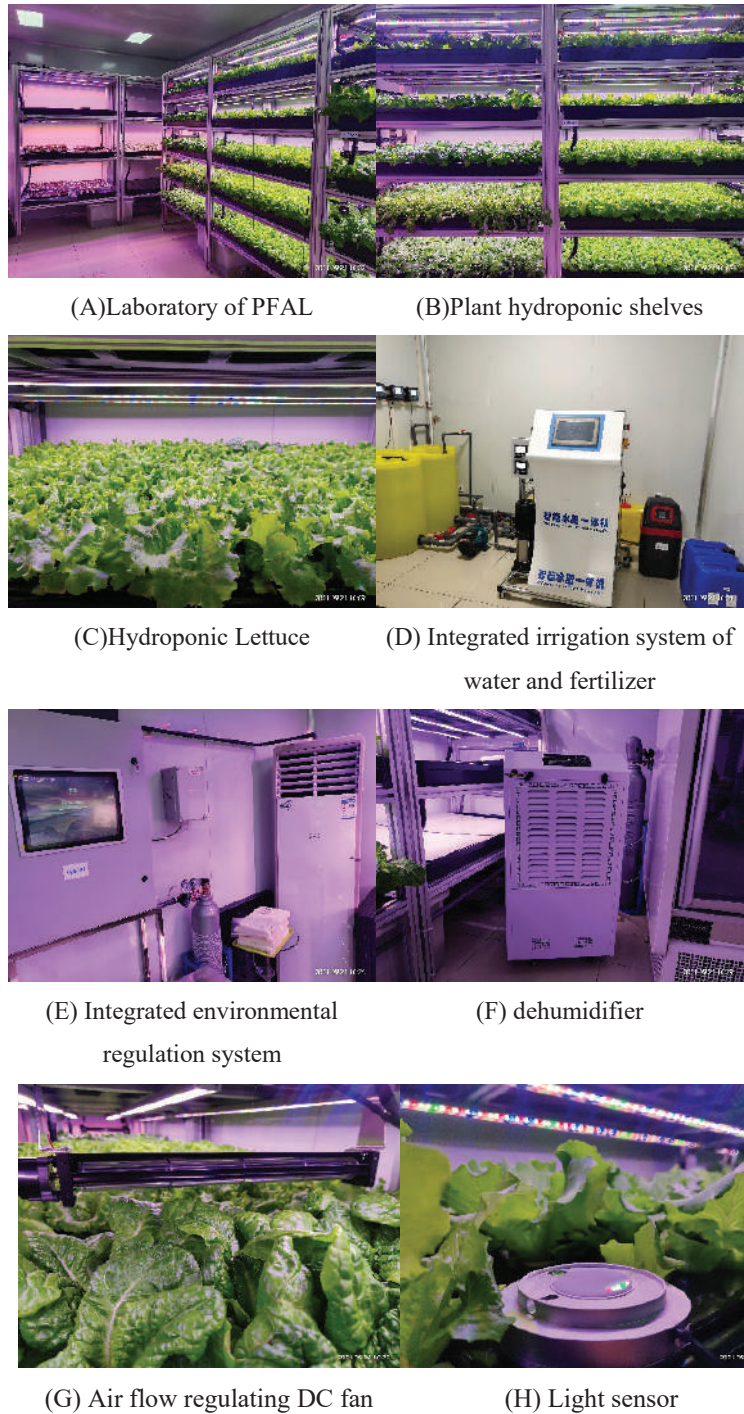


Fig. 1. The PFAL laboratory of our university and some main experimental equipment

1.2. Experiment environment

The experimental LED plant growth light was custom developed by a professional manufacturer from Anhui ANCORGREEN. The light quality, light intensity and light period of LED lamp can be set according to the experimental requirements, and then intelligently controlled by the program.

The light quality is composed of red, blue and white lights according to the set proportion, and the proportion of the three lights can be accurately controlled by the program, and some LED lamps used in the experiment are shown in Fig. 2. When the plants are illuminated to simulate the daytime, the indoor temperature of the laboratory is set at about 23 °C

and the CO₂ concentration is set at about 800ppm. Moreover, when the plants are not illuminated to simulate the night, the indoor temperature of the laboratory is set at about 18 °C and the CO₂ concentration is set at about 400ppm. The humidity setting in the laboratory was maintained between 70% and 80%. The DC fan for airflow regulation of the growing shelves operate for 2 minutes at 10-minute

intervals. The nutrient solution in the planting layer shelves is continuously supplied for 5 minutes at 30-minute intervals, in which the EC value is always maintained at 800 $\mu s / cm$, and the pH value is maintained at about 6.8. LED lamps are installed at the top of each layer of the planting shelves, 28cm away from the lettuce growing canopy, and the plant light time is set to 16 h / d .



Fig. 2. LED plant lighting lamps for experiment

1.3. Experimental design

In order to find out the effects of different illuminations on the growth of lettuce, 60 robust lettuce seedlings were randomly selected, and each 15 seedlings were placed in 4 groups of light conditions for hydroponic culture experiment. The illuminance is set at 200, 300, 400 and 500 $\mu mol / (m^2 \cdot s)$, respectively, which are recorded as T1, T2, T3 and T4. From the first day after transplanting, five plants were randomly selected at 5 p.m. every day to measure and record the plant height, leaf length and leaf width of the outermost leaves of lettuce. When lettuce grows to 50 days, it is ripe and harvested. 8 plants in each control group with better growth are selected and the fresh weight of each plant is weighed, then the average of eight lettuce is found.

1.4. Results and analysis

After 50 days of hydroponic, the lettuce was harvested and the fresh weight of a single plant was weighed, and the results were recorded in Table 1. The lettuce growth and growth curves of different experimental groups are shown in Fig. 3 and Fig. 4, where Fig. 4(a) shows the average

plant height growth curve, Fig. 4(b) shows the average leaf length growth curve, and Fig. 4(c) shows the average leaf width growth curve of lettuce.

It can be seen from table 1 and figure 3 that the growth of hydroponic Lettuce under different illumination conditions is significantly different. In terms of plant morphology, each experimental group of lettuce grew brittle green hypertrophy, but the number of lettuce leaves under 500 $\mu mol / (m^2 \cdot s)$ light was significantly less than that of the first three experimental groups. In terms of biomass accumulation, compared with the average fresh weight of single lettuce after hydroponic culture to 50 days, the biological yield of single lettuce under 400 $\mu mol / (m^2 \cdot s)$ illumination is the highest, which is about 37% higher than that under 200 $\mu mol / (m^2 \cdot s)$ illumination, 23.4% higher than that under 300 $\mu mol / (m^2 \cdot s)$ illumination and 53.8% higher than that under 500 $\mu mol / (m^2 \cdot s)$ illumination. The results showed that the illumination of 400 $\mu mol / (m^2 \cdot s)$ was more suitable for the growth of hydroponic Lettuce in PFALs.

Table 1

Single plant and average fresh weight of lettuce at harvest under different illuminance conditions (illuminance unit: $\mu mol / (m^2 \cdot s)$, Fresh weight: grams)

Illuminance	Fresh weight of single plant								Average fresh weight
T1	112	126	115	109	128	117	119	120	118.25
T2	136	132	128	126	131	129	138	127	130.875
T3	168	163	162	169	158	160	159	153	161.5
T4	96	112	103	97	108	102	106	116	105

As can be seen from Figure 4, with the increase of lettuce growth time, plant height, leaf length and leaf width of hydroponic lettuce show a rising trend, indicating that the illumination gradient setting is reasonable. For

different growth indexes, the growth of lettuce in each experimental group was T3 > T2 > T1 > T4. The results showed that when the illuminance was set below 400 $\mu mol / (m^2 \cdot s)$, gradually increasing the illuminance

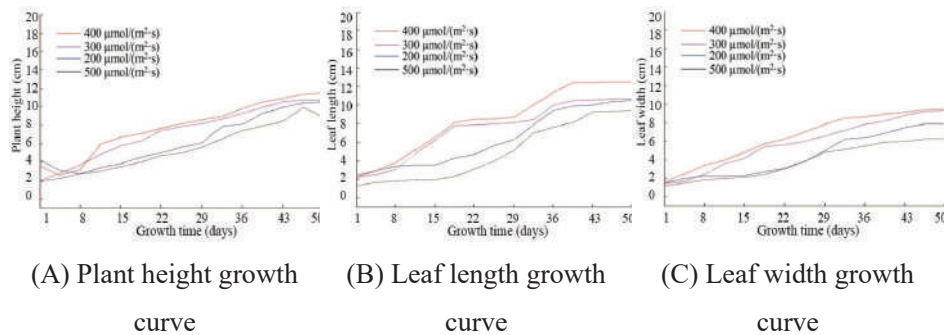


(a) T1 (b) T2 (c) T3 (d) T4

Fig. 3. Growth of lettuce in each experimental group at harvesting

could promote the growth of lettuce. When the illuminance reached $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, the growth of lettuce was inhibited by increasing the illuminance. The reason may be that the LED lamps with high illuminance have high thermal power consumption and high heat, resulting in water

shortage of plants. It is also possible that high-intensity light has caused some damage to plant growth organs or some stress to physiological processes. The results also showed that the illumination of $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ was more suitable for the growth of hydroponic Lettuce in PFALs.



(A) Plant height growth curve (B) Leaf length growth curve (C) Leaf width growth curve

Fig. 4. Growth of lettuce under different illumination

Simulation experiment of illumination uniformity.

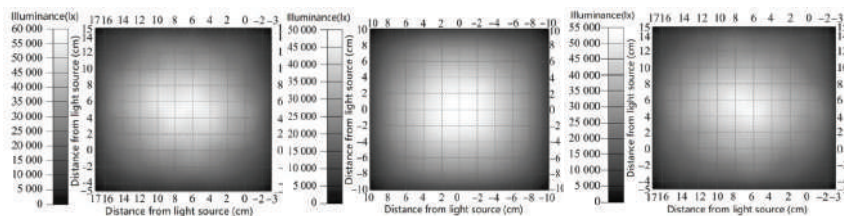
3.1 Experimental design

Generally, led plant light sources are arranged in array, triangle and circle. In order to study the illumination uniformity characteristics of LED light sources with three arrangement modes, we use TracePro optical simulation system and three-dimensional composition method of MATLAB software to simulate the illumination uniformity, compare and analyze the advantages and disadvantages of the illumination uniformity of the three arrangement modes, and provide theoretical guidance for the design

of plant light sources and plant production using artificial light sources.

(1) TracePro optical simulation experimental method

The TracePro optical simulation environment was configured systematically, 25 identical LED beads were selected and arranged into matrix, triangular and circular forms in turn, with the spacing set to 3cm and the light source 28cm away from the lettuce. After the other environmental parameters of the artificial light plant factory laboratory were set, the Tracepro software was run to export the simulation diagram, as seen Fig. 5.



(A) Simulation results of matrix illuminance distribution (B) Simulation results of triangle illuminance distribution (C) Simulation results of circular illuminance distribution

Fig. 5. Simulation results of illuminance distribution in different arrangement modes

(2) Matlab software simulation experimental method

Through the Matlab software system, a three-dimensional diagram is constructed according to the collected illumination data to visually display the distribution of illumination uniformity. The test step is to fix the LED light beads on the top of the planting layer shelf into the form of matrix, triangle and circle with a spacing of 3cm, and the light source

is 28cm away from the coordinate paper. The specification of coordinate paper is 100cm × 100cm, composed of small squares of 1cm × 1cm. After preparation, the illuminance at each small square is measured successively with the illuminance sensor, and the final summary data is constructed into a three-dimensional diagram through Matlab software, as shown in Figure 6.

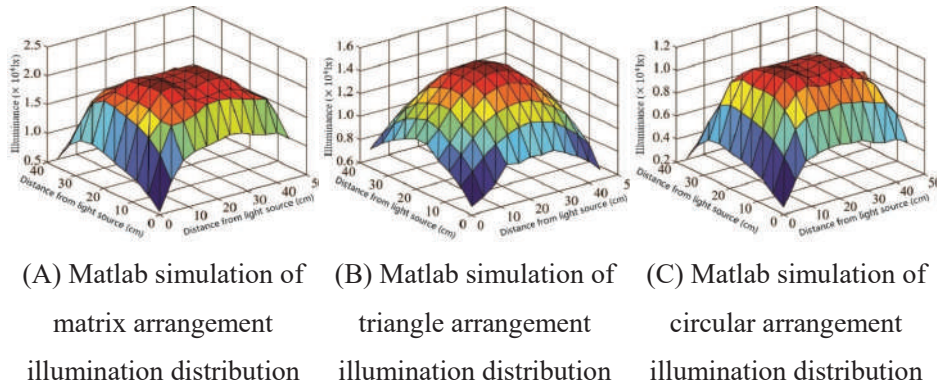


Fig. 6. Matlab simulation of illuminance distribution in different arrangement forms

2.2. Results and analysis

(1) Optical simulation results and analysis of TracePro software

As can be seen from Fig.5, the three arrangement modes all show the light distribution characteristics that the middle area of the light receiving surface is brighter and the surrounding area gradually darkens. Among them, the overall illuminance of LED light sources arranged in matrix is significantly better than that of triangular and circular arrangement modes. Lighting uniformity index refers to the uniformity of illumination distribution. According to the simulation results, the illumination uniformity of the matrix is 80%, as shown in Fig.5(a). The illumination uniformity of triangular form is 71%, as shown in Fig.5(b). The illumination uniformity of the circular type is 79%, as shown in Fig.5(c). Through TracePro computer simulation, it can be shown that the matrix LED light source arrangement form has the best illumination uniformity.

(2) Matlab 3D simulation results and analysis

In the three-dimensional stereogram constructed by MATLAB, the areas with different colors represent different illuminance of the light receiving surface. If the color of the adjacent area is closer or the plane area of the wave crest position is larger, it indicates that the difference of the received illuminance is small and the uniformity is more. From Fig.6(a), Fig.6(b) and Fig.6(c), it can be shown that the middle regions of the three figures show similar colors such as red, dark red and orange, and the middle regions of Fig.6(a) and Fig.6(c) have more similar colors than Fig.6(b). Comparing Fig.6(a) and Fig.6(c), all of them have a certain plane area at the wave peak position, and the plane area in Fig.6(a) is significantly more than that in Fig.6(c), which indicates that the matrix arrangement represented in Fig.6(a) has the best uniformity of illumination. Therefore, the simulation method by Matlab software also proves that

the matrix arrangement of LED light source has the best light uniformity.

Discussion and conclusion.

The light environment parameters of plant cultivation are mainly composed of light source, light quality, illumination, photoperiod, light uniformity and so on. There are many scholars who have conducted relevant studies on some of these factors and found some patterns of the effects of certain factors on plant growth. Yan Zhengnan (2020) systematically studied the effects of white-red and red-blue LED lighting environment on the growth, quality and energy utilization efficiency of two kinds of lettuce, and found that white-red LED light quality can replace red-blue LED light quality and be used in lettuce hydroponic culture to improve resource utilization. Li Dongxing et al. (2012) found that the growth trend of lettuce under 16h continuous light is generally better than that under 16h intermittent light. Kim et al.(2017) and Mu suntao et al. (2020) studied the effects of different pulsed light on the growth, quality and photosynthesis of lettuce. They found that under the same conditions as the net photosynthetic rate of continuous light, the light mode of pulsed light not only did not affect the growth of lettuce, but also improved the quality. They also found that the quality of lettuce treated with pulsed light combined with low frequency and high duty cycle was better. Therefore, they proposed that an appropriate light source should be selected in combination with pulse light energy consumption in actual application. Ding Juanjuan (2014) and Wang Xiaoxu (2017) studied the effects of different duty ratios of LED on the growth, yield, quality and Photosynthesis of lettuce. They found that the duty ratio affected the growth of lettuce from two aspects: light period and dark period, and affected the photosynthesis, growth and development, morphogenesis and yield formation of lettuce by the interaction of light period and dark period.

In this study, the illuminance gradient test found that 400 $\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ illuminance is the best illumination under artificial lighting conditions, and the simulation of TracePro and Matlab software found that matrix LED light source arrangement has the best illumination uniformity compared with triangle and circle arrangement. Through experimental research, we obtained the best light formula of hydroponic Lettuce in PFALs: the plant growth environment temperature is kept at about 22 °C and the humidity is kept between 70%~80%. The LED light source using matrix arrangement in matrix is 28cm away from the lettuce. The compound light with the ratio of red and blue light of 7:1 is used in the seedling stage, and the compound light with the ratio of red and blue light of 6:1 is used in the growth stage. The illuminance is set at 400 Mol, and the photoperiod is set at 16h/d. The light formula can be used as a general scheme for large-scale Hydroponic Lettuce in plant factories, and can also be used as a reference light formula for other varieties of leafy vegetables. This research has certain practical significance for promoting the industrialization and commercial production of artificial light vegetables.

Data availability statement The Micro-Tom tomato datasets constructed for this study are available to the researchers in need according to relevant requirements.

Funding This work is jointly funded by the Department of Science and Technology of Henan Province (Henan

Science and Technology Research Project, grant number 212102110234 and 222102320080) and the Department of Education of Henan Province (Key Scientific Research Project of Colleges and Universities in Henan Province, grant number 22A210013). Open Access funding jointly provided by the Department of Science and Technology and the Department of Education of Henan Province.

Conflict of interest: No personal rights are affected and no third-party conflicts of interest exist.

Ethical approval: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

Informed consent: Informed consent was obtained from all individual participants included in the study. All persons and institutions involved in the production of this manuscript are informed and familiar with the provided results and this publication.

Acknowledgements The authors thank the staff of the Artificial Light Plant Factory laboratory of Henan Institute of science and technology for planting tomatoes for the experiment. The authors are very thankful to the colleagues from the Artificial Intelligence research group for fruitful discussions. The authors would like to thank the Department of Science and technology and the Department of Education of Henan Province for the financial support.

References:

1. Ares G., Birgit H. & Jaeger R. (2021). Consumer attitudes to vertical farming (indoor plant factory with artificial lighting) in China, Singapore, UK, and USA: A multi-method study. *Food Research International*, 110811.
2. Ding J.J. (2014). Effects of LED duty cycle on growth, yield, quality and photosynthetic characteristics of lettuce. Master's thesis, Northwest University of agriculture and forestry science and Technology.
3. He D.X. (2018). New trend of industrialization of artificial light plant factory in China. *Chinese vegetables*, (05): 1-8.
4. Huang L.C. (2019). Consumer Attitude, Concerns, and Brand Acceptance for the Vegetables Cultivated with Sustainable Plant Factory Production Systems. *Sustainability*, 11(18).
5. Huebbers W. and Buyel F. (2020). On the verge of the market – Plant factories for the automated and standardized production of biopharmaceuticals. *Biotechnology Advances*, 107681.
6. Jiang J., Mohagheghi A. & Moallem M. (2020). Energy-Efficient Supplemental LED Lighting Control for a Proof-of-Concept Greenhouse System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(4),3033-3042.
7. Kim S.J., Bok G., Lee G. & Park J. (2017). Growth Characteristics of Lettuce under Different Frequency of Pulse Lighting and RGB Ratio of LEDs. *Protected horticulture and Plant Factory*, 26(2).
8. Kozai T., Hayashi E. & Amagai Y. (2020). Plant factories with artificial lighting (PFALs) toward sustainable plant production. *Acta Horticulturae*, 251-260.
9. Kozai T. (2019). Towards sustainable plant factories with artificial lighting (PFALs) for achieving SDGs. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(5),28-37.
10. Lee K. (2018). Effects of LED Light Quality of Urban Agricultural Plant Factories on the Growth of Daughter Plants of 'Seolhyang' Strawberry. *Journal of Environmental Science International*, 27(10),821-829.
11. Li D.X., Shang S.H., Zhou Z.C., Bu Y.L., Shu Q.W. & Lan L.B. (2012). Effects of different light sources and illumination modes on lettuce growth in plant factories. *Changjiang vegetable*, 2012 (24): 50-52.
12. Liu W.K. and Liu Y.F. (2017). Construction and application of light formula of LED intelligent plant factory. *China lighting appliance*, (10): 1-3.
13. Liu W.K. and Yang Q.C. (2014). Led plant light quality biology and plant factory development. *Science and technology Herald*, 32 (10): 25-2.
14. Maronedze C., Liu X.Y., Huang S.H., Wong C., Zhou X., Pan X.T., Huiting A., Nuo X., Tian X.C. and Wong A. (2018). Towards a tailored indoor horticulture: a functional genomics guided phenotypic approach. *Horticulture Research*, 5(1).
15. Massa D., Kim H., & Mitchell A. (2008). Plant Productivity in Response to LED Lighting. *HortScience*, 43(7),1951-1956.
16. Mou S.T., Wang J.X., Xin X., Yang Z.C. & Wu Y.J. (2020). Effects of different pulsed light on growth, quality and photosynthetic characteristics of lettuce. *China Agricultural Science and technology guide*, 22 (05): 35-41.
17. Orsini F., Pennisi G., & Gianquinto G. (2020). Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). *European Journal of Horticultural Science*, 85(5),297-309.
18. Paucek I., Pennisi G., Pistillo A., Appoloni E. & Gianquinto G. (2020). Supplementary LED Interlighting Improves Yield and Precocity of Greenhouse Tomatoes in the Mediterranean. *Agronomy*, 10(7),1002.

19. Prikupets B., Boos G.V. George V. & Tarakanov I.G. (2019). Optimisation of Lighting Parameters of Irradiation in Light Culture of Lettuce Plants Using LED Emitters. *Light & Engineering*, 43-54.
20. Saito K., Ishigami Y. & Goto E. (2020). Evaluation of the Light Environment of a Plant Factory with Artificial Light by Using an Optical Simulation. *Agronomy*, 10(11),1663.
21. Tsuruyama J. and Shibuya T. (2018). Growth and Flowering Responses of Seed-propagated Strawberry Seedlings to Different Photoperiods in Controlled Environment Chambers. *HortTechnology*, 28(4),453-458.
22. Wang H.O. and Li G.A. (2004). Understanding lighting LED. *China lighting appliance*, 2004 (02): 2-4.
23. Wang M.M. and Wang X.J. (2015). Philips greenpower led tissue culture lamp was successfully applied to tissue culture and propagation of plantain. *China Flower horticulture*, (22): 2-3.
24. Wang X.X. (2017). Effects of LED frequency and duty cycle on growth and photosynthetic characteristics of lettuce. Master's thesis, Northwest University of agriculture and forestry science and Technology.
25. Wei H., Wang M. & Jeong R. (2020). Effect of Supplementary Lighting Duration on Growth and Activity of Antioxidant Enzymes in Grafted Watermelon Seedlings. *Agronomy*, 10(3),337.
26. Wu R.M., Tu D.W., Huang Z.H. & Zhao Q.J. (2009). Illumination uniformity design of LED lighting system. *Optical technology*, 2009,35 (01): 74-76.
27. Yan Z., He D.X., Niu G.H. & Qin Y.H. (2020). Growth, nutritional quality, and energy use efficiency in two lettuce cultivars as influenced by white plus red versus red plus blue LEDs. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(2),33-40.
28. Yang Q.C., Xu Z.G., Chen H.D. & Song C.B. (2011). Application principle and technical progress of LED light source in modern agriculture. *China Agricultural Science and technology guide*, 13 (05): 37-43.
29. Yang Q.C. (2014). Development strategy of plant factory. *Science and technology Herald*, 32 (10): 20-24.
30. Yuan F., Gao Q., Liu I.H. et al. (2021). Chen Jinxing Construction of crop cultivation microenvironment and digital platform technology in plant factory. *Agriculture and technology*, 41 (09): 5-8.
31. Zhu Z., Ying S.S., Hu H.J., Tong X.Y. & Zheng S.H. (2015). Study on illumination distribution and uniformity of LED plant light source array. *Zhejiang Agricultural Journal*, 27 (08): 1489-1493.

Ван Сінфа, аспірант, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна

Зубко В. М., доктор технічних наук, професор, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна

Оничко В. І., кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна

Чжао Минфу, кандидат наук (теорія управління та інженерія), професор, Хенанський інститут науки і технологій, Хенань, Китай

Модельовання екранування рівня освітленості та рівномірності гідропонного салату-латуку на фабриках з вирощування рослин зі штучним освітленням

З розвитком технології світлодіодного освітлення рослин та її широким застосуванням у сільськогосподарському виробництві світлодіодні світильники для вирощування рослин стали основним джерелом світла, яке використовується для освітлення рослин штучним освітленням (PFAL). Штучне джерело світла для рослин відрізняється від природного джерела світла; його найбільшою характеристикою є якість світла, інтенсивність світла, період фотозйомки та форма світла, все можна точно та розумно регулювати, в ідеалі може продовжуватись забезпечення рослини світловою енергією за найнижчої вартості, гарантувати щорічно виробництво та постачання високоякісної та ефективної сільськогосподарської продукції для різних сфер життя людей, які продовжують постачати необхідні свіжі рослинні продукти. Освітлення та рівномірність освітлення мають значний вплив на фотосинтез і ріст рослин, а також є основою проектування системи освітлення рослин у PFAL. У цій статті, досліджувались сорти салату, висаджені в полі, як дослідні матеріали та експериментальні об'єкти. В статті розроблено тест градієнта освітленості, моделюємо рівномірність освітлення світлодіодних форм із різним розташуванням за допомогою методу комп'ютерного моделювання та вивчаємо вплив різного освітлення та різні світлодіодні форми розміщення на зростання біомаси гідропонічного салату в PFAL, щоб забезпечити найкраще освітлювальне рішення для індустріалізації та стандартизованого виробництва салату на заводах. Результати дослідження показали, що: для гідропонного салату в середовищі освітлення PFAL рівномірність освітлення матричного світлодіодного джерела світла є найкращою. Оптимальна відстань освітлення становить від 25 до 30 см від салату. Співвідношення червоно-синього світла в суміші 7:1 є найкращим співвідношенням якості освітлення для салату на стадії розсади, а співвідношення червоно-синього світла в суміші 6:1 є найкращим співвідношенням якості світла в період росту. Оптимальна інтенсивність світла становить 400 мкмоль/м²·с. Найкращий щоденний час освітлення становить 16 годин/день, і час освітлення можна відповідно збільшити, щоб досягти мети завчасного збору врожаю салату.

Ключові слова: LED світлоисточник растений; рецептура света; равномерность освещения; гидропоника; завод искусственного света; городское сельское хозяйство; интеллектуальное сельское хозяйство.

RESEARCH ON WEAR RESISTANCE OF CARBONIZED 45 STEEL BY ELECTRO-SPARK DEPOSITION TECHNOLOGY

Xin Du

Graduate student specialty 133
Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
Graduate student at the Faculty of Engineering Technology
Xinxiang University, Xinxiang, China
ORCID: /0000-0002-1996-602X
51969926@qq.com

Electro-spark deposition (ESD) is a green manufacturing method which is more energy-efficient than traditional heat treatment methods and has minimal environmental pollution. ESD enables rapid carburization of metal surfaces by the graphite electrode. Thus, the wear resistance property of the metal surface is improved. ESD can carburize the surface of large steel structure parts in agriculture, improving wear resistance and service life. The traditional carburizing process costs much money and is difficult to achieve. ESD carburizing can save much money and even carburize the partial surface of the part. The traditional carburizing process cannot achieve these. This research employed rapid ESD equipment with rotary electrodes for the surface carburization of No.45 steel. The experiments used the Taguchi orthogonal array (OA) factorial design method. The four critical factors of the ESD process, such as energy, duty cycle, voltage and frequency, were tested. Four parameters and four levels were used to perform sixteen groups of carburizing experiments. The free-state graphite powder was removed from the surface of the deposited samples. The deposited surfaces were analyzed by X-ray diffraction (XRD). According to the diffraction pattern, the composition of the material was compared. It was found that wear-resistant Fe_3C and modified sintered graphite. The linear reciprocating dry friction experiments at room temperature were carried out with a 6mm CrO_2 friction ball under 15N pressure. The ultra-deep field microscope was used to examine the experimental surfaces, and the characterization parameters were based on the abrasion marks. The parameters were characterized by an ultra-deep field microscope and analyzed according to the abrasion marks. The abrasion marks can help to obtain three feasible deposition process solutions. Finally, the extreme value design of Taguchi OA was carried out on the width of abrasion marks. The optimized process solution was obtained and verified by experiments. In this article, abrasion mark method can better characterize the wear resistance of materials than other methods. The abrasion marks method was more convenient when the interface between the coating and the substrate (such as carburized materials) was not obvious. The process scheme can help enterprises solve the carburizing process of large carbon steel parts.

Key words: Electro-spark deposition, Carburization, Taguchi method, Wear resistance, Abrasion marks.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.2>

1 Introduction

The electro-spark deposition is used as a traditional surface enhancement method. Lazarenko B. and Lazarenko N. initiated the processing theory (Stavitskii, 2010), which is now widely used in surface machining processes. Since metallurgical bonding can be achieved on metal surfaces through electro-spark discharge, ESD can harden metal surfaces and improve their wear resistance and fatigue strength. It is widely used in the generation of surface coatings on metals. The ESD can achieve strengthening on the metal surface, such as carburization (VB Tarelyk et al., 2018), nitriding (Viacheslav Tarelyk et al., 2022), sulphurisation (Viacheslav Tarelyk et al., 2017), nitrocarburisation (Gaponova et al., 2022) and aluminized surface (Kirik et al., 2018).

Viacheslav investigated the carbonization process using discharge energy (VB Tarelyk et al., 2018) and graphite powder (VB Tarelyk et al., 2022). Karavaev studied surface wear resistance with the current and the number of machining cycles in ESD (Karavaev et al., 2019). Shevchenko analyzed the ultrasound method in the process of carburizing (Shevchenko, 2020).

The 45 steel had low cost and good overall mechanical properties but had poor wear resistance (Chen et al., 2013).

The carburizing process was carried out by adding carbon to the surface layer of the metal, which formed a high-strength carbide (Dai et al., 2022). The carburizing furnace was used by adding gas, liquid, or solid in the traditional carburizing process (Nakayama, 1992). The metal was heated to a certain temperature, maintained a particular time to achieve, and carburized (Edenhofer et al., 2015). For large equipment, carburizing required special large equipment and high costs. For some specific structures, it was even hard to carburize. ESD carburizing can be carried out on the surface of large machinery and equipment outdoors without the special carburizing furnace. The carburizing process was studied using graphite electrodes to improve the wear resistance of 45 steel (Padgurskas et al., 2017). It is particularly advantageous for agricultural machinery, pumps, and mechanical tools. These machines are often made from 45 steel, which is a good value for money and is used as the base material.

2 Materials and Methods

2.1 Material Process and Deposition Parameters

First, No. 45 steel with a size of 25*30mm and 2mm thick was used as a sample. Then, the surface was sanded separately using 600-grit sandpaper to remove the oxidized layer and impurities. The surface was

cleaned with 99% ethanol. Finally, a high-speed ESD repair machine (fig.1 Huimite HMT9500, China) was used for carburizing the 45 steel surface. The 3mm diameter graphite rod was used as an electrode, and Argon was

used as a shielding gas. A 4-factor and 4-level test was carried out using a Taguchi OA factorial design (Weiwei et al., 2007). The process parameters are shown in Table 1.



Fig. 1- The high-speed ESD repair machine (HMT9500)

Table 1

The ESD carburizing process parameters

No.	Efficiency(%) A	Voltage(V) B	Current Frequency(Hz) C	Time(s) D
1	20(1)	25(1)	100(1)	120(1)
2	30(2)	35(2)	180(2)	240(2)
3	40(3)	45(3)	260(3)	360(3)
4	50(4)	55(4)	340(4)	480(4)

()-Level values in brackets

2.2 Materials Testing methods

Graphite powder was wiped from the machined surface with a brush. The composition of the deposited surface was analyzed by the X-ray diffraction (XRD) method (Bruker D8, Germany). The experiments were carried out using a linear reciprocating friction wear machine (Huaxin MWF-500, China). The sample was fixed through a special fixture. A 6mm diameter friction ball (ZrO₂, G10 accuracy) was used for the surface abrasion test, as shown in Fig. 2. The electric motor rotated at 100r/min, and the reciprocating distance was 6mm. Thus, the motor performs two times movements per 1 cycle. The experimental time was 15 min for the reciprocal dry friction experiment. The temperature of the experimental environment was 25°C, and the humidity was 53%. Abrasion debris was produced on the surface of the friction samples. The surface powder was removed with a brush. The surface was scratched with alcohol and dried naturally. Then, the samples were weighed on a balance (Sartorius BSA224S-CW, China). Finally, the abrasions were measured with a microscope (Leica DVM6, Germany).

$$V_w \approx L \times \left(2L_{AH} * L_{BC} / 3 + 8L_{AH}^3 / 15L_{BC} \right) \quad (1)$$

$$L_{AH} = R - \sqrt{R^2 - (L_{BC} / 2)^2} \quad (2)$$

In equation 1: V_w -Wear volume of the sample, mm^3 .
 L -Length of abrasion, mm . L_{AH} -Depth of abrasion, mm .
 L_{BC} -Width of abrasion, mm . In equation 2: R -Radius

of the friction ball, mm . Three abrasion mark experiments were carried out, and the relevant parameters were measured.

3 Results and Discussion

3.1 Abrasion morphology of the carbonized experimental samples and non-carbonized samples

Carburization deposition of 45 surfaces was carried out according to the experimental parameters in Table 1. Wear resistance can be analyzed based on the quality of the deposition (Mikhailyuk et al., 2010). Because the carburized surface had graphite powder, this paper used abrasion marks for the analysis (Zhu et al., 2019).

The wear resistance of the metal surfaces was tested using the linear reciprocal friction and wear machine. There were free-form graphite powder and sintered-form graphite powder on the carburized surface. Then, free-form graphite powder on the surface was gently scrubbed with a soft brush. The machine adopted ZrO₂ rubbing ball as counter-abrasive material on a steady pressure of 15 N. Each friction test was carried out three times. The width of the middle part of the abrasion was measured five times. The maximum value, minimum value, and middle values were measured (Fig. 3). At the edges of the abrasions, there were clear spalled areas of the material which were not smooth (Fig. 3a). The distinctive scratches appeared at the upper edge of the abrasion mark. When carbide powder with hard phases on the underside was broken off by the force of the friction ball, it moved toward the outside of the scratch. The abrasions gradually grew in size under the reciprocal rubbing process. The apparent oxidized sheet

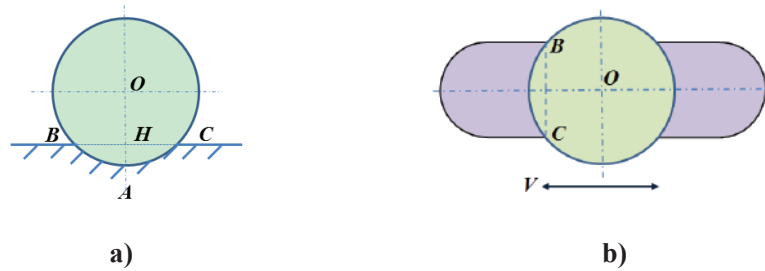


Fig. 2-Schematic diagram of the friction ball: a) parameter diagram of abrasion marks; b) movement diagram of the friction ball

appeared at the bottom of the abrasion, which indicated that the friction force increased during the sliding process. These led to increased surface roughness and plastic deformation of the micro-protrusions. It caused an increase in local temperature and accelerated oxidation of the surface. There were tiny scratches at the bottom of the abrasion, hard

spot burnishing on the bottom, and craters on the surface. Through the experimental comparison group, it was found that the abrasion width was smaller than that of the sample without carbonization (Fig. 3b). Due to the generation of hard particles on the worn surface, the increase in surface friction led to the appearance of an oxidized layer.

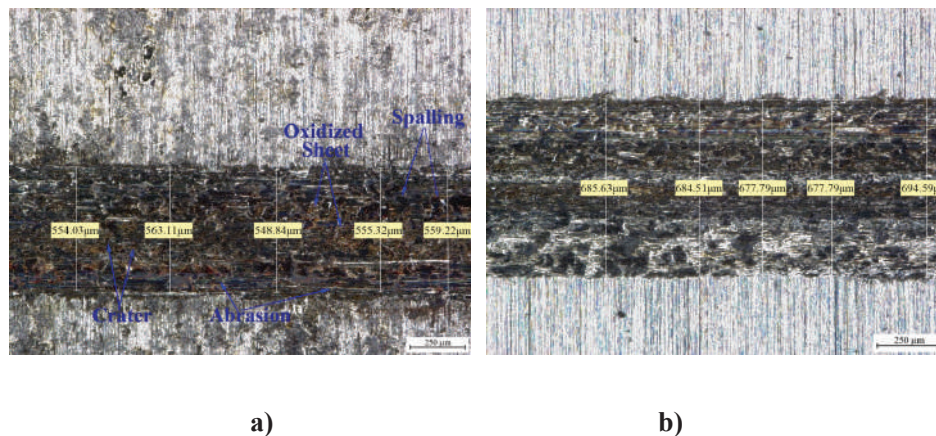


Fig. 3-The 500X morphology of abrasion: a) Abrasion in carbonized materials; b) Abrasion in uncarbonized materials.

3.2 Results of orthogonal carbonization experiments

The deposition experiments were carried out by 4 level 4 factor factorial design. Four factors included efficiency (duty cycle), discharge voltage, current frequency, and time (Xiang et al., 2017). Moreover, the average values and the average variances of the abrasion width were plotted, respectively. The samples without surface carbonization were also analyzed for comparison. It can be seen from Table 2 that the average value of sample 6 was the smallest, and the abrasion width of samples 3, 7, and 15 were smaller (Fig. 4). In the three samples, the variance of sample 15 was better than that of sample 3 and sample 7 (Fig. 5). In contrast, sample 9 had the widest wear masks. Corresponding parameters such as efficiency (duty cycle), discharge voltage, current frequency, and time were all small. The carburizing effect was not good, and the wear resistance was poor.

Due to the accumulation effect of continuous pulses of current, sample 11 had a significant duty cycle value and voltage value, but the electrode graphite was significantly ablated at the head of the electrode,

and the surface deposited was not the highest value for wear resistance. It showed that the abrasion width was smaller, and the wear resistance was better. The variance was also small, indicating that the surface uniformity was good. The average values and the average variances of the abrasion width should be considered comprehensively.

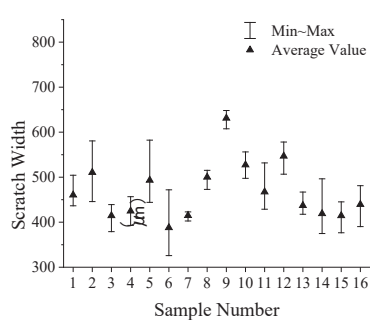
According to the comparison group, it was found that uncarbonized samples had a larger width of abrasion marks than the carburized ones (Fig. 4b). Their mean variances were smaller than that of the carburized group, which indicated that the material properties were close (Fig. 5b). However, carburized samples had been altered material properties due to the different carburizing process parameters. Because the hard phase was unevenly formed on the surface of the carburized sample, it would cause a sizeable average variance.

3.3 XRD analysis of carbonized surface

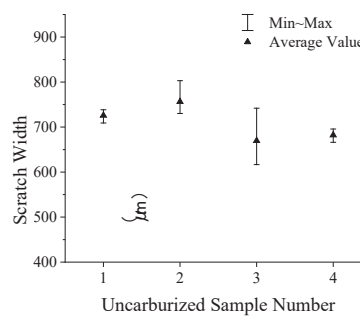
XRD analyses were carried out on the deposited samples. The surface of 45 steel was found to be mainly graphite and Fe_3C . And Fe_3C generated on the surface

The ESD carburizing process parameters

No.	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Abrasion Width	
	A	B	C	D	Average Value ,(μm)	Average Variance,(μm^2)
	Efficiency, (%)	Volt, (V)	Current frequency, (Hz)	Time, (s)		
1	20	45	260	360	460.38	290.58
2	30	25	180	360	510.61	982.07
3	40	55	180	120	414.52	5360.59
4	40	35	340	360	424.84	1272.93
5	50	55	100	360	493.33	4780.89
6	20	55	340	480	387.93	921.12
7	50	35	260	120	414.88	2273.91
8	30	35	100	480	500.09	769.31
9	20	25	100	120	631.11	126.59
10	20	35	180	240	527.41	113.30
11	50	45	180	480	467.29	6410.23
12	30	55	260	240	546.79	1552.33
13	40	25	260	480	437.15	1053.56
14	50	25	340	240	419.06	949.52
15	30	45	340	120	414.47	526.93
16	40	45	100	240	439.39	891.23

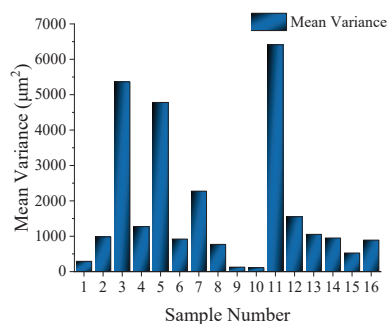


a)

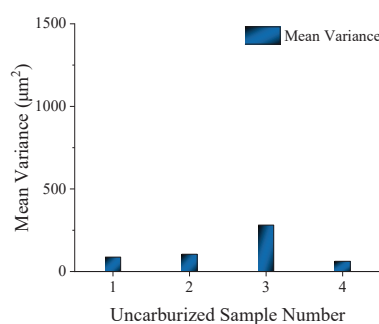


b)

Fig. 4-The Average Value of Abrasion Width: a) Experimental groups of Taguchi OA; b) Uncarburized experimental groups



a)



b)

Fig. 5-The Variance of Abrasion Width: a) Experimental groups of Taguchi OA; b) Uncarburized experimental groups

of 45 steel (Krishnia et al., 2016) was the hard phase that increased wear resistance (BALTUŠNIKAS et al., 2006). In the friction wear test, the surface produced a mixture of Fe₃C hard particles and graphite, which

weakened the lubrication effect of graphite in dry friction. Ferrum was not detected on the surface (Fig. 6), indicating that the surface was completely carbonized.

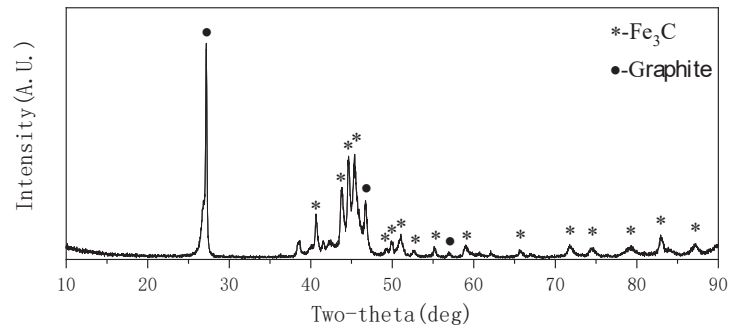


Fig.6- XRD patterns of the carbonized surface on 45 steel

3.4 Data Analysis of Orthogonal Experiment

Orthogonal experimental calculation of deposition data was carried out on 4-factors and 4-levels by Taguchi theory. As the value of the abrasion width was smaller, the wear resistance was better (Reséndiz-Calderón et al., 2020). It was selected that the minimum value corresponded to the four factors. It can be seen from Table 3 that a smaller extreme R meant a more significant factor. According to extreme R, the effect on wear resistance was found to be time D > efficiency A > frequency C > voltage B.

It was found that the longer time did not mean better deposition but that there were essential links in the four factors. In the experiments, the electrode temperature rose too quickly when the duty cycle, voltage, and frequency were large. The graphite ablation was serious. So the deposition process could not obtain optimal results (Fig.7). Therefore, reasonable process parameters were the key to the carburized process.

In Table 3, A4B2C1D3 was chosen as optimal parameters. Among the experimental samples, A1B4C1D3 (sample 6),

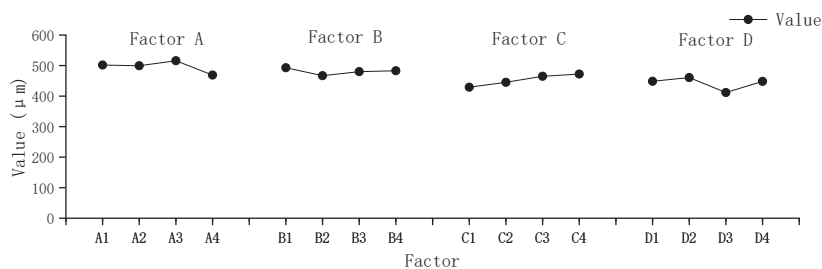


Fig. 7-Variation trend of the width of the abrasion marks with process parameters

A3B4C4D1 (sample 15), and A4B2C3D1 (sample 7) have better wear resistance and surface uniformity. They can also be used as an alternative in industrial applications.

3.5 Surface abrasion morphology and parameters of the optimal process

The optimal process parameters were selected for deposition (Table 4). Fig. 8 shows finer abrasion marks. It indicated that the material had better wear resistance. Although the solidified graphite was deposited on the surface, it had a small brown oxidized layer in the middle of the abrasion marks on the surface. The mass of wear powder was smaller, and the abrasion width was narrower. So the surface wear resistance was better. The average abrasion width of sample 2 (Fig. 4b) was 756.441 µm. According to equation 2, the depth of abrasion was 23.937 µm, which was substituted into equation 1 to obtain the volume of 85.484 × 10⁻⁶ mm³.

The density of Ferrum was 7.87g/cm³, and the wear quality was calculated as 6.73 × 10⁻⁴g.

Table 4

Optimal process parameters for surface carbonization deposition on 45 steel

A4	B2	C1	D3
Efficiency, (%)	Voltage, (V)	Current frequency, (Hz)	Work Time, (s)
50	35	180	360

Similarly, in the optimal process, the average value of the abrasion width was 268.206µm, and the depth of abrasion was 2.999 µm according to Equation 2, which was substituted into Equation 1 to give a volume of 3.217 × 10⁻⁶cm³. Because the density of fe3c was 7.694 g/cm³ (Haynes et al., 2016),

Orthogonal experimental calculation

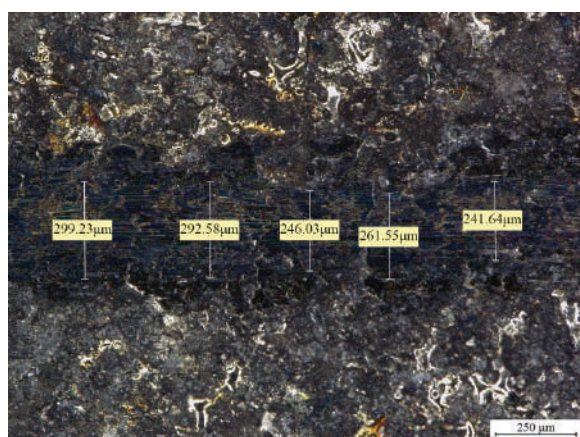
	A	B	C	D	Value
1	1	3	3	3	460.38
2	2	1	2	3	510.61
3	3	4	2	1	414.52
4	3	2	4	3	424.84
5	4	4	1	3	493.33
6	1	4	4	4	387.93
7	4	2	3	1	414.88
8	2	2	1	4	500.09
9	1	1	1	1	631.11
10	1	2	2	2	527.41
11	4	3	2	4	467.29
12	2	4	3	2	546.79
13	3	1	3	4	437.15
14	4	1	4	2	419.06
15	2	3	4	1	414.47
16	3	3	1	2	439.39
k1j	501.71	492.99	428.98	448.64	
k2j	499.48	466.81	445.38	460.64	
k3j	515.98	479.96	464.80	411.58	
k4j	468.75	483.16	472.29	448.12	
QJ	1985.92	1922.92	1811.45	1768.97	
MIN	468.75	466.81	428.98	411.58	
R(MAX-MIN)	47.24	26.19	43.32	49.07	
OPTIMAL VALUE	A4	B2	C1	D3	

the abrasion mass was 2.47×10^{-5} g. The balance is difficult to guarantee the measurement accuracy of the quality. Due to the rough texture of the abrasive surface (Fig. 8b) (Zhu et al., 2019), the actual wear quality should be smaller than the theoretical calculation. The wear resistance was compared by the abrasion width, and the width of the wear scar has excellent accuracy compared to the quality on the carburized

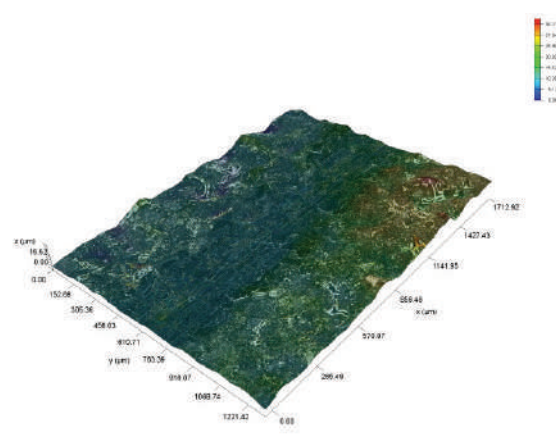
surface of 45 steel. Optimization of the carburizing parameters results in better wear resistance.

4 Conclusions

Metal surfaces can be easily carbonized by the graphite electrode. On the basis of the obtained test results, ESD can increase the wear resistance of the material surface. Process parameters are essential in electro-spark deposition.



a)



b)

Fig. 8-Surface abrasion morphology of the optimal process:
a) 2D Shape; b) 3D super depth of field morphology.

1) It was used to comprehensively evaluate the wear resistance with better results than average width and average variance of abrasion marks when the graphite powder and the grinding dust were small in mass. This article showed the abrasion marks method was easier than other method in the carburized materials.

2) It was used Taguchi's factorial method and calculation to find out the optimal process to guide graphite deposition. The deposition parameter values were larger, but the abrasion width was not necessarily smaller, and the wear resistance was not necessarily the best. An optimal process parameter and three industrial alternatives were found by experimental design.

3) Free graphite powder and sintered graphite powder are produced on the carbonized surface. If the wear resistance is analyzed according to the quality of the deposition, graphite powder on the surface is susceptible to treatment methods and humidity. These can then cause significant errors in the statistical results. Therefore, the abrasion marks method can accurately evaluate wear resistance. It can be used in powder composites.

4) The graphite powder on the surface reduced friction in the early stages of friction, but it had a limited effect with the hard abrasive powder on the reduction of friction. There even was an oxidized layer on the deposition of the surface.

References:

1. BALUŠNIKAS, A., & Levinskas, R. (2006). XRD analysis of carbide phase in heat resistant steels. *Materials Science*, 12(3), 192-198.
2. Chen, L., Meng, H.-M., Huang, L.-L., & Liu, J.-Y. (2013). Microstructure and wear property of multi-layer YG8 ESD coating on 45 steel. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 34(11), 170-175. doi:CNKI:SUN:JSCL.0.2013-11-033
3. Dai, Y., Kang, L., Han, S., Li, Y., Liu, Y., Lei, S., & Wang, C. (2022). Surface hardening behavior of advanced gear steel C61 by a novel solid-solution carburizing process. *Metals*, 12(3), 379. doi:https://doi.org/10.3390/met12030379
4. Edenhofer, B., Joritz, D., Rink, M., & Voges, K. (2015). Carburizing of Steels. In *Thermochemical surface engineering of steels* (pp. 485-553): Elsevier.
5. Gaponova, O. P., Tarelnyk, V. B., Antoszewski, B., Radek, N., Tarelnyk, N. V., Kurp, P., . . . Hoffman, J. (2022). Technological features for controlling steel part quality parameters by the method of electrospark alloying using carburezer containing Nitrogen—Carbon components. *Materials*, 15(17), 6085. doi:https://doi.org/10.3390/ma15176085
6. Karavaev, D., Matygullina, E., Doshchennikov, M., & Sinyushov, D. (2019). Wear resistance of steel parts after electrospark alloying by graphite electrodes. *Russian Engineering Research*, 39(10), 889-891. doi:https://doi.org/10.3103/S1068798X19100113
7. Kirik, G., Gaponova, O., Tarelnyk, V., Myslyvchenko, O., & Antoszewski, B. (2018). Quality analysis of aluminized surface layers produced by electrospark deposition. *Powder Metallurgy Metal Ceramics*, 56(11), 688-696. doi:https://doi.org/10.1007/s11106-018-9944-6
8. Krishnia, L., Kumari, R., Kumar, V., Singh, A., Garg, P., S Yadav, B., & K Tyagi, P. (2016). Comparative study of thermal stability of filled and un-filled multiwalled carbon nanotubes. *Advanced Materials Letters*, 7(3), 230-234. doi:https://doi.org/10.5185/amlett.2016.6149
9. Mikhailyuk, A., & Gitlevich, A. (2010). Application of graphite in electrospark technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46(5), 424-430.
10. Nakayama, K. (1992). An overview of the excess carburizing process. *International Journal of Materials Product Technology*, 7(3), 245-256. doi:https://doi.org/10.1504/IJMPT.1992.036511
11. Padgurskas, J., Kreivaitis, R., Rukuiža, R., Mihailov, V., Agafii, V., Kriūkienė, R., . . . Technology, C. (2017). Tribological properties of coatings obtained by electro-spark alloying C45 steel surfaces. 311, 90-97. doi:https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.098
12. Reséndiz-Calderón, C., Farfan-Cabrera, L., Oseguera-Peña, J., & Rodríguez-Castro, G. (2020). Wear and friction of boride layer in CoCrMo alloy under different micro-abrasion modes (rolling and grooving abrasion). *Materials Letters*, 279, 128500. doi:https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128500
13. Shevchenko, O. (2020). *Ultrasound effect on electrospark cementation process*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
14. Stavitskii, B. I. (2010). Glimpses of the history of electrospark machining of materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46(2), 178-191. doi:https://doi.org/10.3103/s1068375510020183
15. Tarelnyk, V., Haponova, O. P., & Konoplianchenko, Y. V. (2022). Electric-spark Alloying of Metal Surfaces With Graphite. *Progress in Physics of Metals*, 23(1), 27-58. doi:https://doi.org/10.15407/ufm.23.01.027
16. Tarelnyk, V., Konoplianchenko, I., Gaponova, O., Radionov, O., Antoszewski, B., Kundera, C., . . . Gerasimenko, V. (2022). *Application of wear-resistant nanostructures formed by ion nitriding & electrospark alloying for protection of rolling bearing seat surfaces*. Paper presented at the 2022 IEEE 12th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP).
17. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Gaponova, O., Konoplianchenko, I., Dovzyk, M., Tarelnyk, N., & Gorovoy, S. (2017). *New sulphiding method for steel and cast iron parts*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
18. Tarelnyk, V., Paustovskii, A., Tkachenko, Y. G., Martsynkovskii, V., Belous, A., Konoplyanchenko, E., & Gaponova, O. (2018). Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application. *Surface Engineering Applied Electrochemistry*, 54(2), 147-156. doi:http://doi.org/10.3103/s106837551802014x

19. Weiwei, C., Ying, Z., Hui, K., Ping, Q., Ruijun, W., & Xiaoou, H. (2007). Study on thickness of WC-8Co reinforcing layer deposited by new EDM system on TC1 alloy surface. *New Technology & New Process*, 5(3), 93-94, 112. doi:10.3969/j.issn.1003-5311.2007.05.032
20. Xiang, H., Ke, F., Tan, Y.-f., Wang, X.-l., & Hua, T. J. T. o. N. M. S. o. C. (2017). Effects of process parameters on microstructure and wear resistance of TiN coatings deposited on TC11 titanium alloy by electrospark deposition. 27(8), 1767-1776. doi:https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60199-7
21. Zhu, T., Shipway, P., & Sun, W. (2019). The dependence of wear rate on wear scar size in fretting; the role of debris (third body) expulsion from the contact. *Wear*, 440-441, 203081. doi:https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203081

Сінь Ду, аспірант, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна; Коледж Сінсян, Китай
Дослідження стійкості до зносу карбонізованої 45 сталі за допомогою технології осадження електропроводу

Електроіскрове осадження (EIO) - це екологічно чистий метод виробництва, який є більш енергоефективним, ніж традиційні методи термічної обробки, і має мінімальне забруднення навколишнього середовища. EIO забезпечує швидке науглецювання металевих поверхонь графітовим електродом. Таким чином, покращується зносостійкість металевої поверхні. EIO може знеуглецювати поверхню великих сталевих конструкцій у сільському господарстві, покращуючи зносостійкість і термін служби. Традиційний процес цементації коштує багато грошей і його важко досягти. Електрохімічне знеуглецювання може заощадити багато грошей і навіть знеуглецювати часткову поверхню деталей. Традиційний процес цементації не може цього досягти. У цьому дослідженні було використано обладнання для швидкого електроерозійного знеуглецювання з обертовими електродами для поверхневого знеуглецювання сталі №45. В експериментах використовувався метод факторного планування ортогональних матриць Тагучі. Було протестовано чотири критичні фактори процесу електроерозійної обробки, такі як енергія, робочий цикл, напруга і частота. Чотири параметри і чотири рівні були використані для проведення шістнадцяти груп експериментів з цементації. Порошок графіту у вільному стані був видалений з поверхні осаджених зразків. Осаджені поверхні були проаналізовані методом рентгенівської дифракції (XRD). За дифракційною картиною порівнювали склад матеріалу. Було виявлено, що зносостійкий Fe_3C і модифікований спечений графіт. Експерименти з лінійного зворотно-поступального сухого тертя при кімнатній температурі проводили з 6-міліметровим фрикційним шариком CrO_2 під тиском 15 Н. Для дослідження експериментальних поверхонь використовували надглибокий польовий мікроскоп, а параметри характеристики базувалися на слідах стирання. Параметри були охарактеризовані за допомогою надглибокого польового мікроскопа та проаналізовані відповідно до слідів стирання. Сліди стирання можуть допомогти отримати три можливих технологічних рішення для осадження. Нарешті, було проведено розрахунок екстремальних значень Taguchi OA по ширині слідів стирання. Оптимізоване технологічне рішення було отримано і перевірено експериментально. У цій статті показано, що метод слідів стирання може краще характеризувати зносостійкість матеріалів, ніж інші методи. Метод слідів стирання виявився більш зручним, коли межа розділу між покриттям і підкладкою (наприклад, обуглені матеріали) не була очевидною. Технологічна схема може допомогти підприємствам вирішити процес карбюризації великих деталей з вуглецевої сталі.

Ключові слова: Електроіскрове осадження, цементація, метод Тагучі, зносостійкість, сліди стирання.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ГОЛОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

Бернацький Артемій Володимирович

кандидат технічних наук, старший дослідник

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-8050-5580

bernatskyi@paton.kiev.ua

Курило Володимир Андрійович

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-0790-9404

vladkurilo@ukr.net

Сучек Олександр Михайлович

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-8961-3887

suchek_48@ukr.net

Сіора Олександр Васильович

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-1927-790X

siora_ov@ukr.net

Соколовський Микола Володимирович

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0003-3243-5060

ksvmua@gmail.com

Шамсутдінова Наталія Олександрівна

Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, Україна

ORCID: 0000-0002-3525-0080

shamsutaliia@gmail.com

Сільськогосподарське машинобудування традиційно займає важливе місце в структурі машинобудівного комплексу України. Закордоном набули популярності методи, спрямовані на розвиток технологічних підходів вирішення проблеми процесу зношування ріжучих кромки інструментів сільськогосподарської техніки, які полягають у лазерному наплавленні на робочі поверхні дисків виготовлених з вуглецевих конструкційних або низьколегованих сталей додаткових шарів з зносостійких матеріалів у вигляді порошку. Товщина таких додаткових шарів залежить від розмірів самих інструментів сільськогосподарської техніки та може становити від 100 мкм до 1000 мкм. Для продовження терміну служби інструментів сільськогосподарської техніки, наноситься наплавлення на тильний бік ріжучої кромки, що дозволяє зберегти лезо гострим на весь термін служби ножа, за рахунок ефекту самозаточування. Складна геометрія робочої частини інструментів сільськогосподарської техніки та їх мала товщина, обумовлюють необхідність використання автоматизованих сучасних технологій лазерного порошкового наплавлення. Метою даної роботи є розробка та виготовлення технологічного устаткування у вигляді технологічної головки для лазерного наплавлення інструментів сільськогосподарської техніки. Авторами досліджень проаналізовано існуючі сучасні розробки способів наплавлення на тонкостінні деталі сільськогосподарської техніки. Розроблено ескізний проєкт головки для лазерного наплавлення, як необхідного технологічного устаткування. Згідно розробленого ескізного проєкту, наплавочна головка являє собою сукупність модульних легко змінних вузлів, з'єднаних між собою в єдину конструкцію з використанням схеми коаксіальної газопорошкової подачі порошкового матеріалу у зону наплавлення. На відміну від аналогів, у розробленій голові для лазерного наплавлення запропонована оригінальна конструкція соплової насадки, що повинна забезпечити не тільки стабільний процес наплавлення, а також захист ванни розплаву та металу, що охолоджується від взаємодії з оточуючим середовищем. Створена конкурентоспроможна високотехнологічна продукція (головка для лазерного наплавлення), що за своїми технічними показниками не поступається закордонним аналогам, а за вартісними показниками дешевша у декілька разів закордонним аналогів. Також очікується, що в результаті реалізації запланованих робіт будуть розроблені технологічні рекомендації та технологічні інструкції з лазерного наплавлення функціональних шарів на тонкостінні деталі, що працюють в умовах механічного

зношування. Очікується збільшення на 30...50% ресурсу та довговічності тонкостінних інструментів для сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: лазерне наплавлення, технологічна головка, розробка, тонкостінні деталі, сільськогосподарська техніка.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.3>

Вступ. Сільськогосподарське машинобудування традиційно займає важливе місце в структурі машинобудівного комплексу України (Didur, Gritsaienko, & Gritsaienko, 2017; Sahaidak, Tepliuk, Zhurylo, Rudenko, & Samko, 2021; Sozanskyu & Koval, 2021). В структурі парку сільськогосподарських машин України дискові борони займають близько 40% від загальної кількості ґрунтообробних знарядь. Причому, якість їх роботи в значній мірі залежить від конструктивних параметрів дискових робочих органів. Як відомо в процесі роботи номінальні розміри диска та фрези, в результаті спрацювання зазнають змін, що значно впливає на всі показники технологічного процесу обробки ґрунту (Benos, Tsaopoulos, & Bochtis, 2020; Kehayov, Popova, & Zahariev, 2021; Upadhyay, Raheman, & Dubey, 2022). У зв'язку з цим набуває актуальності розробка методів підвищення довговічності та працездатності вказаних ґрунтообробних знарядь.

Кукурудза – одна із цінних стратегічних у світі культур в сільському господарстві, яка за останні пару десятків років збільшила свої посівні площі та продуктивність (Egenstein, Chamberlin, & Sonder, 2021; Khodaei, Javanmardi, & Khaneghah, 2021; Waqas, Wang, Zafar, Noor, Hussain, Azher Nawaz, & Farooq, 2021). Нині на кукурудзу припадає до 50% виробництва зерна, тоді як 2000-х роках припадало лише 16%. Аналітики Мінагрополітики у звіті 2021 року вказували, що українські аграрії у сезоні 2021 року зібрали близько 40 млн. т. кукурудзи, з яких 31,5 млн. т. планувалося реалізувати на експорт на сумму близько 5,0 млрд. долларів США (Anonymous, 2021 (за даними сайту <https://latifundist.com>)). Відповідно актуально є потреба у якісній сільськогосподарській техніці для збирання врожаю. Кукурудзяні жатки поєднують в собі переваги дбайливого відривання качанів та ефективного подрібнення стебел. Два вальці затягують та переминають стебло кукурудзи, відриваючи при цьому качани, в той час як оснащений 15 дисковими ножами ріжучий ротор, який обертається в напрямку протилежному обертанню вальців, повністю подрібнює їх листя і стебла. У сучасних жатках загальна довжина площини зрізу становить близько 5,5 метра на ряд. У кукурудзяних жатках може бути від 4 до 12 рядів. Відповідно у одній жатці може бути від 60 до 180 ріжучих дисків, які працюють в умовах інтенсивного механічного зношування. У зв'язку з цим набуває актуальності розробка методів підвищення довговічності та працездатності дискових ножів кукурудзяних жаток.

В Україні найпоширенішими методами підвищення довговічності та працездатності вказаних сільськогосподарських знарядь є наступні: 1) використання для виготовлення інструментів матеріалів з високими характеристиками твердості та зносостійкості, наприклад сталі 65Г (Gulyarenko, & Vembenek, 2022; Tulaganova,

Yunushuzhaev, & Juraeva, 2022; Vasilenko, et al., 2021); 2) використання складної термічної (або термомеханічної) обробки; 3) зміна кутів заточування ріжучих кромки. Але ці методи не дозволяють у значній мірі збільшити ресурс та довговічність ґрунтообробних знарядь.

Закордоном набули популярності інші методи, спрямовані на розвиток технологічних підходів вирішення проблеми процесу зношування ріжучих кромки інструментів сільськогосподарської техніки, які полягають у лазерному наплавленні на робочі поверхні дисків виготовлених з вуглецевих конструкційних або низьколегованих сталей додаткових шарів з зносостійких матеріалів у вигляді порошку (сумішей на основі заліза чи кобальту з додаванням часток з високою твердістю, наприклад карбиду вольфраму) (Perrin, Achache, Meausoone, & Sanchette, 2021; Xu, Song, Li, M., Li, F., Guo, & Gao, 2021). Товщина таких додаткових шарів залежить від розмірів самих інструментів сільськогосподарської техніки та може становити від 100 мкм до 1000 мкм. Для продовження терміну служби інструментів сільськогосподарської техніки, наноситься наплавлення на тильний бік ріжучої кромки, що дозволяє зберегти лезо гострим на весь термін служби ножа, за рахунок ефекту самозаточування. Складна геометрія робочої частини інструментів сільськогосподарської техніки та їх мала товщина (зазвичай 3...6 мм), обумовлюють необхідність використання автоматизованих сучасних технологій лазерного порошкового наплавлення. Конкуруючі технології, такі як плазмове наплавлення, дугове наплавлення, вимагають попереднього підігріву деталей і тому не можуть застосовуватись при виробництві таких тонких деталей (для уникнення деформацій деталей, викликаних залишковими напруженнями).

Метою даної роботи є розробка та виготовлення технологічного устаткування у вигляді технологічної головки для лазерного наплавлення інструментів сільськогосподарської техніки.

Матеріали і методи досліджень. Авторами досліджень було використано наступні методи досліджень:

1. Проаналізовано існуючі сучасні розробки способів наплавлення на тонкостінні деталі сільськогосподарської техніки.

2. Розроблено ескізний проєкт головки для лазерного наплавлення, як необхідного технологічного устаткування.

3. Виготовлено необхідне технологічне устаткування для лазерного наплавлення.

Результати досліджень. При створенні композиційних покриттів дедалі більше застосовується процес коаксіального газопорошкового лазерного наплавлення. Розподіл частинок порошку в газопорошковому потоці є важливим параметром, що впливає як на продуктивність процесу, так і на його якість. Створення композицій-

ної структури покриття з порошкового матеріалу ускладнено у зв'язку з різною щільністю та формою частинок компонентів. При постійних витратах газів та порошку розподіл є стаціонарним і залежить від багатьох факторів: розміру частинок, їх форми, щільності їхнього матеріалу, з якого вони складаються. Наприклад, частинки сферичної форми приймають швидкість газу та переносяться у ламінарному потоці, частинки неправильної форми переміщуються більш розрізнено, потік порошку таких частинок нестаціонарний. Внаслідок наплавлення покриття такими матеріалами розподіл елементів у кінцевому валику може бути нерівномірним.

Коаксіальна подача – це метод обробки деталей більш акуратним способом, ніж при багатострумнинній подачі. Крім осі симетричності пучка, такий метод дозволяє отримати найбільш тонкий газопорошковий потік, дозволяє наносити валики шириною від 200...300 мкм.

Діаметр лазерного пучка у зоні обробки може становити 300...1000 мкм, а ефективність використання порошку може досягати 70%, чого не забезпечують методи з багатоструменевою подачею.

Згідно розробленого ескізного проекту, наплавочна головка являє собою сукупність модульних легко змінних вузлів, з'єднаних між собою в єдину конструкцію з вико-

ристанням схеми коаксіальної газопорошкової подачі порошкового матеріалу у зону наплавлення (рис. 1).

На відміну від аналогів, у розробленій головці для лазерного наплавлення запропонована оригінальна конструкція соплової насадки, що повинна забезпечити не тільки стабільний процес наплавлення, а також захист ванни розплаву та металу, що охолоджується від взаємодії з оточуючим середовищем (рис. 2).

Це реалізується за рахунок конструктивних особливостей соплової насадки, а саме, розділення газових потоків на три складові, кожна з яких виконує окрему функцію: перша – захист оптики; друга – транспортування порошку та захист ванни розплаву; третя – захист від впливу оточуючого середовища (рис. 2).

Розглянемо окремо складові створеної головки для лазерного наплавлення. Пристрій оснащений системою водяного охолодження (рис. 3). Має охолоджуючий контур для зняття надлишкового тепла з сопел в процесі наплавлення для підводу та відведення охолоджуючої рідини використано два швидкозатискні фітинги S6520 6-1/8 фірми Samozzi під поліетиленову трубку діаметром 6/4 мм. В нижній частині промінепровід має внутрішню різьбу M20×1,0 мм для встановлення внутрішнього сопла (рис. 4).

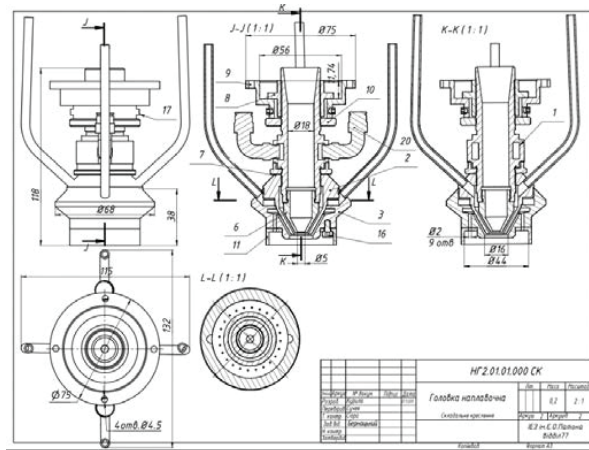


Рис. 1. Ескізне креслення (а) та виготовлена наплавочна головка (б)

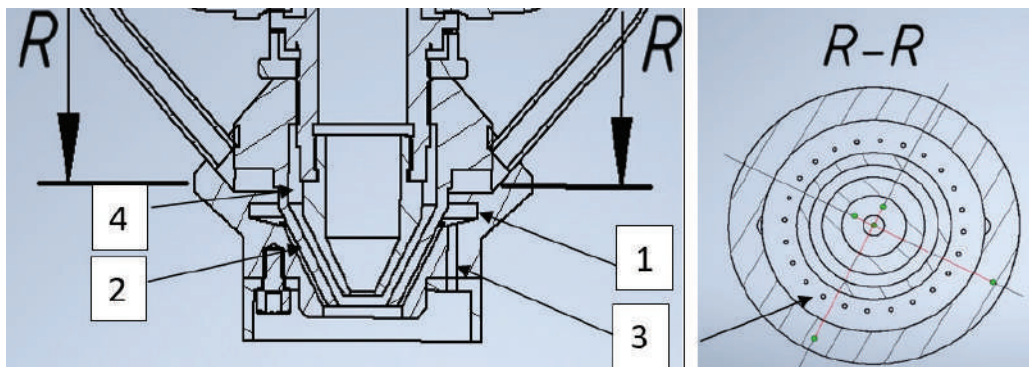


Рис. 2. Конструктивне утворення каналів в розробленій лазерній головці: 1 – камера захисного газу; 2 – канал між соплами; 3 – отвори між камерою та захисним ковпаком; 4 – канал подачі порошку

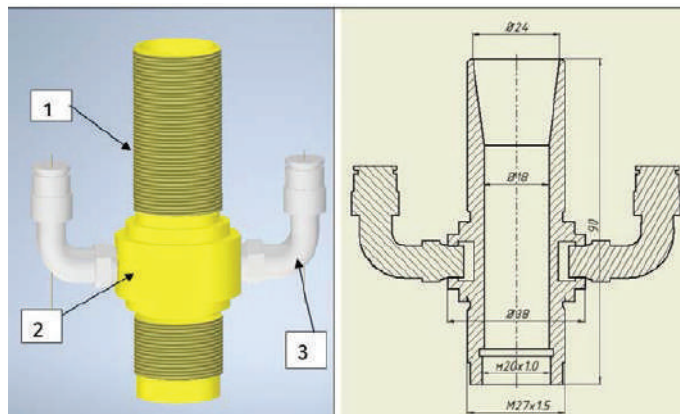


Рис. 3. Модель (а) та ескізне креслення частини головки для лазерного наплавлення з системою водяного охолодження (б), де 1 – корпус для проходження лазерного випромінювання; 2 – корпус водяного охолоджувача; 3 – штуцер подачі охолоджуючої рідини

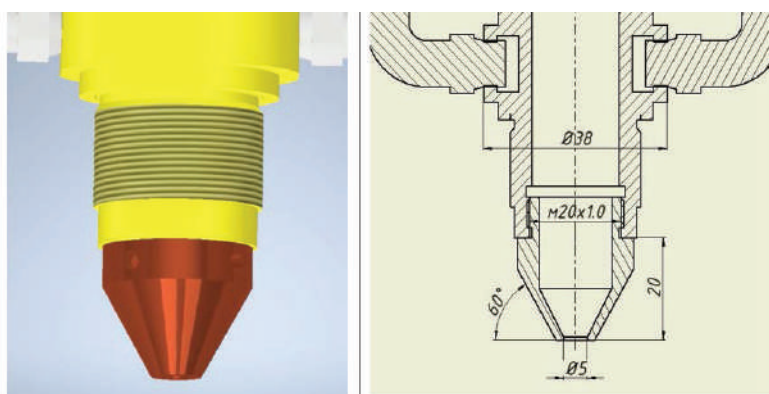


Рис. 4. Корпус зі встановленим внутрішнім соплом

Сопло показане на рис. 5 призначено для формування каналу подачі порошку вздовж внутрішнього сопла та його фокусування. Зміна зазору відбувається за рахунок переміщення сопла вздовж корпусу технологічної головки по різьбі. Подача порошку відбувається по двох мідних трубках впаяних в сопло. Корпус сопла виконано з міді. Фіксація зазору між внутрішнім соплом та соплом подачі порошку відбувається за допомогою контргайки (рис. 2).

Сопло захисного газу призначено для створення каналу подачі захисного газу вздовж сопла подачі порошку та його фокусування (рис. 6).

Зміна зазору відбувається за рахунок переміщення сопла захисного газу вздовж корпусу сопла подачі порошку по різьбі (рис. 6). Фіксація зазору між соплом подачі газу та соплом подачі порошку відбувається за допомогою фіксуючих гвинтів. Подача захисного газу відбувається по двох мідних трубках впаяних в сопло. Сопло виготовлено з міді. Для створення ламінарного потоку захисний газ спочатку потрапляє в камеру, яка утворюється при складанні між соплом подачі порошку та соплом подачі захисного газу, а потім через ряд отворів проникає в канал між цими соплами. Захисний ковпак (рис. 6) створює замкнений простір над розплавленою ванною в якому знаходиться захисний газ.

Газ в захисний ковпак проникає через ряд отворів між соплом подачі захисного газу та захисним ковпаком (рис. 2). Захисний ковпак фіксується до сопла подачі газу за допомогою 3-х гвинтів М4 (рис. 6).

Обговорення. Лазерне наплавлення як метод нанесення металевих шарів, бере свій початок від методу лазерного легування, що з'явився дещо раніше (Shelyagin, Bernatskyi, Siora, Nabok, Shamsutdinova, & Sokolovskyi, 2021). У разі наплавлення за рахунок подачі матеріалу, що наплавляється (в основному у вигляді порошку, рідше – у вигляді дроту) у зону дії сфокусованого в пляму діаметром 1,0...5,0 мм лазерного випромінювання на оброблюваній поверхні створюється шар певної висоти із заданими фізико-хімічними характеристиками. Можливі також варіанти лазерного наплавлення за попередньо нанесеними на підкладку шарами матеріалу, що наплавляється. Ці шари наносять газотермічним напиленням або обмазуванням, що складається з наплавного порошку з адгезуючим матеріалом, а потім переплавляють лазерним випромінюванням. Наплавлені шари металу пов'язані з матеріалом основи перехідною зоною порівняно малих (зазвичай від 5...10 мкм до 50...200 мкм) розмірів (Kritskiy, Pohudina, Kovalevskiy, Tsegelnyk, Kombarov, 2022).

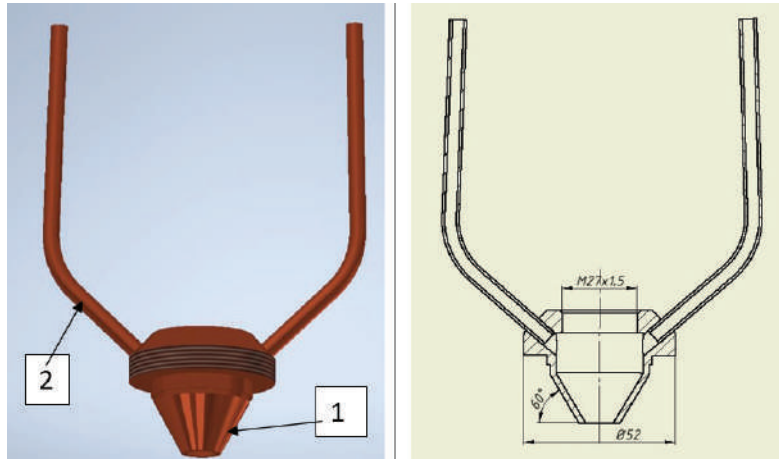


Рис. 5. Загальний вигляд та поперечний розріз сопла для подачі порошку для наплавлення: 1 – сопло наплавочного порошку; 2 – канали подачі порошку

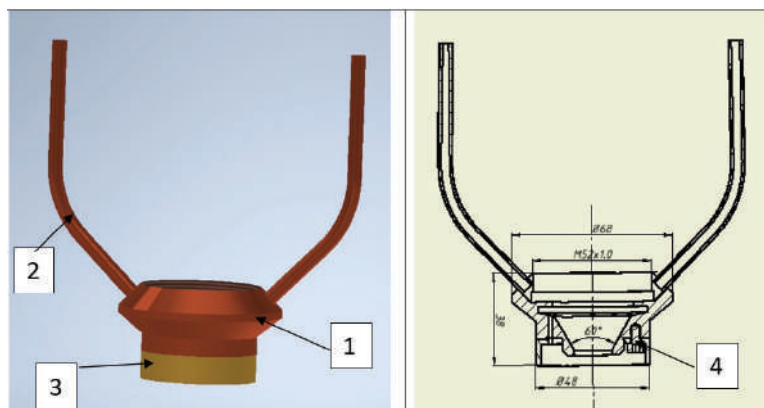


Рис. 6. Загальний вигляд та поперечний розріз сопла для подачі захисного газу: 1 – сопло захисного газу; 2 – трубки подачі порошку; 3 – ковпак захисний; 4 – гвинт фіксації захисного ковпака

Одним із найважливіших моментів у технології лазерного наплавлення є метод подачі матеріалу, що наплавляється до деталі, що обробляється. Вивчення процесів лазерного наплавлення показало, що в той час як у процесах з подачею дроту реалізується перевага проведення обробки практично в будь-якому просторовому положенні, перевага порошкових матеріалів полягає у більш ефективному поглинанні лазерного випромінювання. Наплавлення в нижньому положенні може здійснюватися шляхом попереднього розподілу порошку на поверхні, що обробляється. Застосування порошкових матеріалів в інших просторових положеннях зазвичай вимагає попереднього нанесення покриттів такими методами, як газополум'яне напilenня, плазмове напilenня або пічна сушка пасти обмазки. Якщо порошок не можна розподілити заздалегідь по поверхні, його подають спеціальними дозаторами. На сьогоднішній день найбільш широкое поширення набув метод лазерного наплавлення, при якому використовують присадні порошкові матеріали, що подаються безпосередньо в зону дії лазерного випромінювання за допомогою спеціальних порошкових дозаторів різних конструкцій (Kritskiy, Pohudina, Kovalevskiy, Tsegelnyk, Kombarov, 2022).

До переваг лазерного наплавлення відносяться: можливість нанесення шарів із заданими властивостями висотою 0,1...3,0 мм; значне послаблення ефекту перерозподілу компонентів з матеріалу основи в наплавлений шар, що сприяє підвищенню точності прогнозування результатів і максимальному наближенню властивостей наплавленого шару до вихідних властивостей матеріалу, що наплавляється; отримання рівноосних дрібнокристалічних структур наплавленого металу та малої (до 0,1...0,5 мм) зони термічного впливу; мінімізація припуску під фінішну механообробку до величин близько 0,3...0,5 мм на сторону, за рахунок малої шорсткості (до Ra 200...300 мкм) наплавлених поверхонь.

До недоліків лазерного наплавлення можна віднести: наявність поперечних холодних мікротріщин у шарах наплавлення та легування, виникнення яких є наслідком релаксації високих внутрішніх напружень розтягування; можливість утворення як внутрішніх, так і зовнішніх пор, пов'язана з неметалевими вclusions і залишковою вологістю порошку, що наплавляється, а також забрудненням поверхні, що наплавляється; порівняльну дорожнечу процесу, пов'язану з порівняно високою собівартістю лазерного обладнання (Khaskin, Korzhuk,

Tkachuk, Peleshenko, Voitenko, & Oleinychenko, 2016). Питання контролю, зниження та повного усунення тріщиноутворення при лазерному наплавленні досліджувалися у різний час багатьма авторами. Порівняно недавно авторами з ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України було запропоновано математичну модель цього явища, що дозволило зв'язати відстані між тріщинами з механічними властивостями наплавлених шарів та їх товщинами (Khaskin, Korzhyk, Tkachuk, Peleshenko, Voitenko, & Oleinychenko, 2016; Shelyagin, Bernatskiy, Siora, Nabok, Shamsutdinova, & Sokolovskiy, 2021). Зі сказаного випливає, що до перспективних напрямів усунення недовліків процесу можна віднести методи, що дозволяють знизити залишкові термічні напруження в шарах, що наплавляються в поєднанні з ретельною підготовкою наплавочних порошків і поверхні на яку здійснюється наплавлення.

За допомогою лазерного наплавлення отримують зносо-і корозійностійкі наплавлені шари з досить широкої гами матеріалів. Однак, в Україні у першій половині 80-х років лазерне наплавлення знайшло широке застосування не при виготовленні нових деталей, а як процес відновлення зношених деталей техніки, що працюють в умовах тертя ковзання, ударних навантажень, абразивного зносу тощо (Khaskin, Korzhyk, Tkachuk, Peleshenko, Voitenko, & Oleinychenko, 2016; Kritskiy, Pohudina, Kovalevskiy, Tsegelnyk, Kombarov, 2022; Shelyagin, Bernatskiy, Siora, Nabok, Shamsutdinova, & Sokolovskiy, 2021).

Сьогодні у промислово розвинених країнах лазерне наплавлення, як технологія, що застосовується на стадії виготовлення деталей, не втратила своєї актуальності (Perrin, Achache, Meausoone, & Sanchette, 2021; Waqas, Wang, Zafar, Noor, Hussain, Azher Nawaz, & Farooq, 2021; Xu, Song, Li, M., Li, F., Guo, & Gao, 2021). Лазерне наплавлення закордоном застосовується, зокрема, при виготовленні ґрунтообробних знарядь (дисків, фрез, тощо) та інструментів для збирання врожаю (дисківих ножів кукурудзяних жаток). В Україні наразі відсутні підприємства, які застосовують технології лазерного наплавлення зносостійких матеріалів у вигляді порошку при виготовленні вказаних сільськогосподарських інструментів. Тому вказані інструменти для сільськогосподарських машин, які мають подовжений ресурс завдяки зносостійким наплавленим шарам металу, закуповуються закордоном.

Створена конкурентоспроможна високотехнологічна продукція (головка для лазерного наплавлення), що за своїми технічними показниками не поступається закордонним аналогам, а за вартісними показниками дешевша у декілька разів закордонним аналогів (вартість яких перевищує 30000 євро). Також очікується, що в результаті реалізації запланованих робіт будуть розроблені технологічні рекомендації та технологічні інструкції з лазерного наплавлення функціональних шарів на тонкостінні деталі, що працюють в умовах механічного

зношування. Очікується збільшення на 30...50% ресурсу та довговічності тонкостінних інструментів для сільськогосподарської техніки (ножів та дисків для жаток).

Розроблене технологічне устаткування у вигляді технологічної головки для лазерного наплавлення, технологічні рекомендації та технологічні інструкції з лазерного наплавлення функціональних шарів на тонкостінні деталі сільськогосподарської техніки, що працюють в умовах механічного зношування, планується до впровадження при виконанні послуг ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України з лазерного наплавлення для підприємств сільськогосподарського машинобудування України. Надалі таке технологічне устаткування зможе бути тиражоване для промислового впровадження на інших підприємствах які виготовляють деталі для сільськогосподарської техніки в Україні та світі. Одержані результати також будуть в подальшому використовуватись у ІЕЗ ім. Є.О. Патона для проведення наукових досліджень при відпрацюванні технологій лазерного наплавлення функціональних шарів на тонкостінні деталі, що працюють в умовах механічного зношування для різних галузей промисловості, на стадіях виготовлення та ремонту. Впровадження відпрацьованого комплексу технологічних заходів лазерного наплавлення, дозволить у подальшому вирішувати широкий комплекс завдань, які ставлять не тільки сільськогосподарське машинобудування, а й ракетобудівна, хімічна, медична, оборонна, та інші галузі промисловості при виготовленні широкого спектру деталей з необхідністю застосування лазерного наплавлення.

Висновки. Розроблено ескізний проєкт головки для лазерного наплавлення, як необхідного технологічного устаткування. Згідно розробленого ескізного проєкту, наплавочна головка являє собою сукупність модульних легкозмінних вузлів, з'єднаних між собою в єдину конструкцію з використанням схеми коаксіальної газопорошкової подачі порошкового матеріалу у зону наплавлення. На відміну від аналогів, у розробленій головці для лазерного наплавлення запропонована оригінальна конструкція соплової насадки, що повинна забезпечити не тільки стабільний процес наплавлення, а також захист ванни розплаву та металу, що охолоджується від взаємодії з оточуючим середовищем. Створена конкурентоспроможна високотехнологічна продукція (головка для лазерного наплавлення), що за своїми технічними показниками не поступається закордонним аналогам, а за вартісними показниками дешевша у декілька разів закордонним аналогів. Також очікується, що в результаті реалізації запланованих робіт будуть розроблені технологічні рекомендації та технологічні інструкції з лазерного наплавлення функціональних шарів на тонкостінні деталі, що працюють в умовах механічного зношування. Очікується збільшення на 30...50% ресурсу та довговічності тонкостінних інструментів для сільськогосподарської техніки.

Бібліографічні посилання:

1. Anonymous (2021, November 30). *World Corn Market 2021 and Ukrainian Realities: From Global to Local*. Retrieved from <https://latifundist.com/analytics/27-svtovij-rinok-kukurudzi-2021--ukransk-real-vd-globalnogo-do-okalnogo>

2. Aramide, B., Pityana, S., Sadiku, R., Jamiru, T., & Popoola, P. (2021). Improving the durability of tillage tools through surface modification – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(1), 83–98. DOI: 10.1007/s00170-021-07487-4
3. Benos, L., Tsaopoulos, D., & Bochtis, D. (2020). A review on ergonomics in agriculture. part II: Mechanized operations. *Applied Sciences*, 10(10), 3484. DOI: 10.3390/app10103484
4. Didur, V., Gritsaienko, H., & Gritsaienko, I. (2017). Investment of agricultural machinery in agricultural production of Ukraine. *Mechanization in agriculture & conserving of the resources*, 63(1), 11–14. Retrieved from <https://stumejournals.com/journals/am/2017/1/11>
5. Erenstein, O., Chamberlin, J., & Sonder, K. (2021). Estimating the global number and distribution of maize and wheat farms. *Global Food Security*, 30, 100558. DOI: 10.1016/j.gfs.2021.100558
6. Gulyarenko, A., & Bembenek, M. (2022). The method of calculating ploughshares durability in agricultural machines verified on plasma-hardened parts. *Agriculture*, 12(6), 841. DOI: 10.3390/agriculture12060841
7. Kehayov, D., Popova, R., & Zahariev, I. (2021). Determination of agro-technical indicators in soil treatment in orchards. *Scientific Papers. Series B, Horticulture, LXV(1)*, 758–761. Retrieved from http://horticulturejournal.usamv.ro/pdf/2021/issue_1/Art103.pdf
8. Khaskin, V., Korzhyk, V., Tkachuk, V., Peleshenko, S., Voitenko, O., & Oleinychenko, T. (2016). The process of laser and laser-plasma cladding. *American Scientific Journal*, (2-2), 74–78.
9. Khodaei, D., Javanmardi, F., & Khaneghah, A. M. (2021). The global overview of the occurrence of mycotoxins in cereals: A three-year survey. *Current Opinion in Food Science*, 39, 36–42. DOI: 10.1016/j.cofs.2020.12.012
10. Kritskiy, D., Pohudina, O., Kovalevskiy, M., Tsegelnyk, Ye., Kombarov, V. (2022). Powder mixtures analysis for laser cladding using OpenCV Library. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 367* (pp. 924–937). DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_72
11. Perrin, T., Achache, S., Meausoone, P. J., & Sanchette, F. (2021). Characterization of WC-doped NiCrBSi coatings deposited by laser cladding; effects of particle size and content of WC powder. *Surface and Coatings Technology*, 425, 127703. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.127703
12. Sahaidak, M., Tepluk, M., Zhurylo, V., Rudenko, N., & Samko, O. (2021). Integrative viewpoint for implementing sustainable management agricultural business excellence. *TEM Journal*, 10(1), 303–309. DOI: 10.18421/TEM101-38
13. Shelyagin, V., Bernatskyi, A., Siora, O., Nabok, T., Shamsutdinova, N., & Sokolovskyi, M. (2021). Historical review of technological CO₂ lasers development, manufacturing and operation stages at E.O. Paton electric welding institute of the NAS of Ukraine. In *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* (pp. 589–593). DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575940
14. Sozanskyi, L., & Koval, L. (2021). Key trends in the development of mechanical engineering in Ukraine. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Bankowej w Poznaniu [The WSB University in Poznan Graduate Research Journal]*, 94(3), 49–60. DOI: 10.5604/013001.0015.8441
15. Tulaganova, L., Yunushuzhaev, S., & Juraeva, G. (2022). Improving the wear resistance and durability of cultivator tools. *Journal of Physics: Conference Series*, 2373(2), 022026. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022026
16. Upadhyay, G., Raheman, H., & Dubey, R. (2022). Novel draught resistance sensing elements for measurement of drawbar power of agricultural machinery. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 20(4), e0208. DOI:10.5424/sjar/2022204-19171
17. Vasilenko, M. O., Rogovskii, I. L., Voinash, S. A., Maksimovich, K. Yu., Sokolova, V. A., Garbuzova, T. G., ... & Ariko, S. Yu. (2021). Research of weight and linear wear from resource indicators of cultivator paws hardened by combined method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 677(3), 032025. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032025
18. Waqas, M. A., Wang, X., Zafar, S. A., Noor, M. A., Hussain, H. A., Azher Nawaz, M., & Farooq, M. (2021). Thermal stresses in maize: effects and management strategies. *Plants*, 10(2), 293. DOI: 10.3390/plants10020293
19. Xu, L., Song, Z., Li, M., Li, F., Guo, J., & Gao, M. (2021). Self-Grinding silage knife strengthened with Ni–WC alloy prepared by laser cladding. *Applied Sciences*, 11(21), 10236. DOI: 10.3390/app112110236

Bernatskyi A. V., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Kurilo V. A., Researcher, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Suchek O. M., Researcher, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Siora O. V., Researcher, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Sokolovskyi M. V., Researcher, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Shamsutdinova N. O., Engineer, E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Development of a technological head for laser cladding of agricultural machinery

Agricultural engineering traditionally occupies an important place in the structure of the engineering complex of Ukraine. Abroad, methods aimed at the development of technological approaches to solving the problem of the process of wearing

the cutting edges of agricultural machinery tools have gained popularity, which consist in the laser cladding of additional layers of wear-resistant materials in the form of powder onto the working surfaces of discs made of carbon structural or low-alloy steels. The thickness of such additional layers depends on the size of the agricultural machinery tools themselves and can range from 100 microns to 1000 microns. To extend the service life of agricultural machinery tools, cladding is applied to the back side of the cutting edge, which allows you to keep the blade sharp for the entire service life of the knife, due to the self-sharpening effect. The complex geometry of the working part of agricultural machinery tools and their small thickness make it necessary to use automated modern technologies of laser powder cladding. The purpose of this work is the development and manufacture of technological equipment in the form of a technological head for laser cladding of agricultural machinery tools. The authors of the research analyzed existing modern developments of methods of cladding on thin-walled parts of agricultural machinery. A sketch project of the head for laser cladding, as the necessary technological equipment, has been developed. According to the developed sketch project, the cladding head is a set of modular, easily replaceable nodes connected to each other in a single structure using the scheme of coaxial gas-powder supply of powder material to the cladding zone. Unlike analogues, the developed head for laser cladding offers an original design of the nozzle nozzle, which should ensure not only a stable cladding process, but also protection of the molten bath and the cooling metal from interaction with the surrounding environment. A competitive high-tech product (head for laser cladding) was created, which in terms of its technical indicators is not inferior to foreign analogues, and in terms of cost indicators is several times cheaper than foreign analogues. It is also expected that as a result of the implementation of the planned works, technological recommendations and technological instructions for laser cladding of functional layers on thin-walled parts operating under mechanical wear conditions will be developed. A 30...50% increase in resource and durability of thin-walled tools for agricultural machinery is expected.

Key words: *laser cladding, technological head, development, thin-walled parts, agricultural machinery.*

ДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ РОТОРІВ НАСОСІВ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ТА ДИСКОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ В ШПАРИННИХ УЩІЛЬНЕННЯХ

Горовий Сергій Олександрович

кандидат технічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-4136-5965

gorovyj64@gmail.com ,

Головченко Галина Степанівна

старший викладач

Сумський національний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-3662-6163

golgalstep@gmail.com

Відцентрові насоси знайшли застосування в найрізноманітніших галузях промисловості й сільського господарства всіх країн світу. В зв'язку із широким використанням відцентрових насосів продовжують залишатися актуальними питання відпрацювання їх конструктивних схем, які забезпечують високі показники довговічності та вібраційної надійності. Гідродинамічні сили в шпаринних ущільненнях насосів створюють істотний вплив на вібраційну активність ротора в цілому. Значні гідродинамічні сили в зазорах безконтактних ущільнень відцентрових насосів можуть привести до втрати динамічної стійкості ротора та автоколивань ротора (що неприпустимо), а також навпаки – суттєво знизити вібраційну активність ротора в ущільненнях. Теоретичні й експериментальні дослідження різних авторів дозволили встановити структуру гідродинамічних сил і визначити величини коефіцієнтів радіальних сил. Виникла потреба в подальших практичних дослідженнях, з метою отримання достовірної інформації щодо впливу геометричної форми ротора на його здатність до самоцентрування в ущільненнях при різних кутових швидкостях обертання, аж до втрати ротором динамічної стійкості. На спеціально створеному лабораторному експериментальному стенді авторами даної роботи були отримані амплітудні частотні характеристики (АЧХ) вимушених радіально – кутових коливань самоустановлювальних у щілинних ущільненнях роторів насосів циліндричної й дискової геометричних конфігурацій при різних перепадах тиску робочої рідини на ущільненнях. Також були отримані амплітудні частотні характеристики вимушених радіально – кутових коливань ротора із знешкодженням закрутки робочої рідини на вході в ущільнення. Отримані експериментальним шляхом АЧХ роторів дозволили визначити критичні кутові швидкості радіальних і кутових коливань роторів в ущільненнях, а також межі їх динамічної стійкості. По теоретичних формулах були розраховані кутові швидкості власних радіальних і кутових коливань ротора в ущільненнях, а також межі їх динамічної стійкості. Порівняння теоретичних і експериментальних величин вказує на їх гарний кількісний збіг. Зроблений висновок щодо вищої динамічної стабільності ротора дискової геометричної конфігурації в порівнянні із циліндричною конфігурацією. При проектуванні відцентрових насосів із самоустановлювальним у щілинних опорах – ущільненнях робочим колесом слід прагнути до дискової геометричної конфігурації робочого колеса.

Ключові слова: відцентровий насос, шпаринне ущільнення, ротор насоса, ротор, що самоцентрується в ущільненнях, гідродинамічні сили, тиск рідини, радіально – кутові коливання ротора в ущільненнях, динамічна стійкість ротора, амплітудна частотна характеристика ротора в ущільненнях.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.4>

Вступ (Introduction). На сьогоднішній день відцентрові насоси знайшли застосування в найрізноманітніших галузях промисловості й сільського господарства всіх країн світу. В зв'язку із широким використанням відцентрових насосів продовжують залишатися актуальними питання відпрацювання їх конструктивних схем, які забезпечують високі показники довговічності та вібраційної надійності. При цьому працездатність відцентрового насоса суттєво залежить від гідромеханічної системи "ротор – щілинне ущільнення": згідно статистичних даних ця система породжує 70 % випадків виходу з ладу відцентрових насосів (злам ротора, зачіпання ротора за статорні втулки ущільнень, ушкодження або зношування втулок ущільнень і т.п.) (Grokhovskiy, 1990). Значні гідродинамічні сили в зазорах безконтактних ущільнень відцентрових насосів можуть привести до втрати динамічної стійкості ротора та автоколивань ротора (що

неприпустимо), а також навпаки – суттєво знизити вібраційну активність ротора в ущільненнях.

В роботах професора В.А. Марцинковського по методології розрахунку гідродинамічних параметрів безконтактних ущільнень (Martsinkovskiy, 1980), (Martsinkovskiy & Vorona 1987), (Martsinkovskiy, 2002) показано, що рух ротора приводить до зміни осередненого гідравлічного опору кільцевої щілини з перерозподілом тиску в кільцевому каналі безконтактного ущільнення, що є причиною виникнення гідродинамічних сил. В.А. Марцинковським були отримані аналітичні лінеаризовані вирази для розрахунку коефіцієнтів радіальних сил у шпаринному ущільненні в короткій кільцевій щілині з урахуванням конусності зазору й перекоосу осей роторної й статорної втулок ущільнення. Внаслідок перекоосу осей змінюється сумарний ексцентриситет ротора, що враховується додатками до радіальних сил (коригуючими коефіцієн

тами). Також показано, що дія циркуляційної сили може привести до втрати ротором динамічної стійкості та до автоколивань ротора зі значною амплітудою.

Автором даної роботи були продовжені теоретичні дослідження з уточнення коефіцієнтів гідродинамічних сил в ущільненнях, а також були отримані деякі практичні результати динамічних випробувань відцентрового насоса із само встановлювальним у шпаринних опорах – ущільненнях робочим колесом. Результати досліджень наведені в роботах (Gorovoi, 2017), (Gorovoi, 2019), (Gorovoi & Golovchenko, 2020), (Gorovoi, et al. 2021).

Виникла потреба в подальших практичних дослідженнях з метою отримання достовірної інформації щодо впливу геометричної форми ротора на його здатність до самоцентрування в ущільненнях при різних кутових швидкостях обертання, аж до втрати ротором динамічної стійкості.

Матеріали і методи досліджень (Materials and Methods). З метою одержання повної динамічної картини самоцентрування обертового в ущільненнях ротора насоса був створений експериментальний стенд для динамічних випробувань роторів різної геометричної конфігурації (мал. 1).

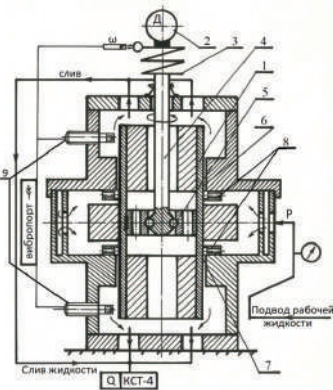


Рис. 1. Схема стенда для динамічних випробувань ротора в ущільненнях

- 1 – ротор, 2 – електродвигун, 3 – пружна податлива муфта,
- 4 – вал, 5 – карданний шарнір, 6 – верхнє ущільнення,
- 7 – нижнє ущільнення, 8 – втулки з радіальними отворами,
- 9 – струмовихорові датчики переміщень ротора

Крутний момент від двигуна 2 передавався на ротор 1 за допомогою пружної податливої муфти 3 і карданного шарніра 5, забезпечуючи ротору 1 можливість радіально – кутових переміщень із утриманням в осьовому напрямку. Подача рідини під тиском нагнітання в робочу камеру стенда проводилася через систему радіальних отворів по периметру внутрішньої оболонки камери, що виключало виникнення односторонньо спрямованих струминних впливів рідини на поверхню випробуваного ротора. Вертикальне компонування роторної системи дозволило одержати картину радіально – кутових коливань ротора 1 під дією силових факторів виключно з боку ущільнень 6, 7.

В конструкції стенда передбачалася можливість знешкодження закрутки рідини на вході в ущільнення. Для цього встановлювалися спеціальні втулки (поз. 8, мал. 1) з отворами й кільцевою канавкою перед глад-

кими циліндричними ущільненнями. Таке комбіноване ущільнення ефективно протистоїть закрутці потоку на вході в щілину на всіх частотах обертання ротора.

Геометричні розміри ущільнень стенда (мал. 1):

радіус ущільнення: $r = 30 \text{ мм} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;

довжина ущільнення: $l = 20 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;

радіальний зазор: $h_0 = 0,25 \text{ мм} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;

відстань по осі від центру ротора до центру ущільнення: $L = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

У верхнього й нижнього ущільнень стенда (мал. 1, поз. 6, 7) було встановлено по два струмовихорові датчики переміщень (поз. 9) під кутом 90° один до одного в площині, перпендикулярній осі ущільнень. Сигнали з датчиків переміщень реєструвалися й оброблялися спеціалізованим приладом "Вібропорт" фірми "Брюль і Кьєр". Форма сигналів (амплітуда, частота, фазовий зсув) і відповідна траєкторія руху центрів ротора під місцями розташування датчиків спостерігалися на екрані електронного осцилографа С 1-68. Приладом "Вібропорт" здійснювалися виміри кутової швидкості обертання (частоти обертання) ротора з точністю ± 1 оберт / хвилину.

Для відпрацювання оптимальної геометричної форми самоустановлювального в щілинних ущільненнях ротора були виготовлено три експериментальні ротори:

ротор – циліндр № 1 (мал. 2) з переважним по величині екваторіальним J_x моментом інерції,

ротор № 2 (мал. 3) із проміжним співвідношенням осьового J_o й екваторіального J_x моментів інерції,

ротор № 3 (мал. 4) з майже дисковою конфігурацією.

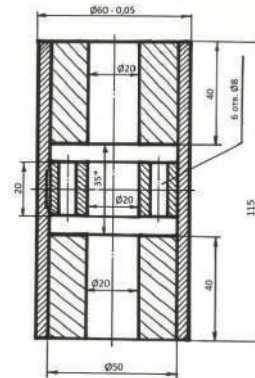


Рис. 2. Ротор – циліндр № 1

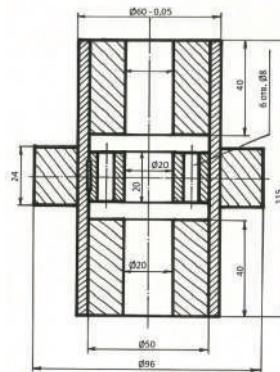


Рис. 3. Ротор № 2

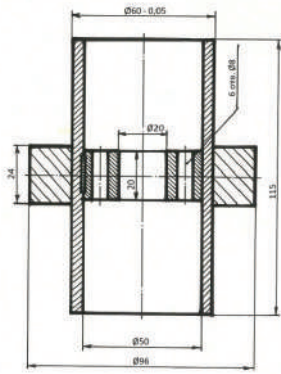


Рис. 4. Ротор № 3

Моменти інерції роторів визначалися за їх масами і геометричними розмірами їх частин згідно з методикою роботи (Favorin, 1970). Маси й розрахункові моменти інерції роторів зведено в таблицю 1.

Геометрична форма ротора № 3 дозволила майже зрівняти осьовий J_o і екваторіальний J_e моменти інерції ротора й практично звести до нуля гіроскопічний момент ротора, пропорційний різниці його моментів інерції (Martsinkovskiy & Vorona, 1987).

Результати (Results). На дослідному стенді були отримані амплітудні частотні характеристики (АЧХ) усіх трьох роторів у щільних ущільненнях з неконтрольованою закруткою потоку на вході в ущільнення (мал. 5, мал. 6, мал. 7).

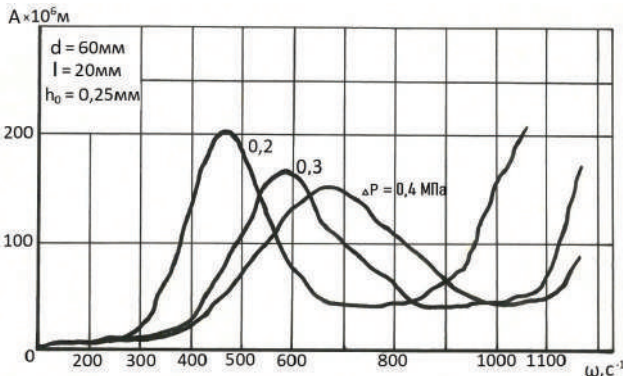


Рис. 5. АЧХ ротора - циліндра № 1

Також були отримані АЧХ ротора № 2 в ущільненнях із знешкодженням закортки потоку на вході в зазори ущільнень (мал. 8).

Експериментальні АЧХ усіх трьох роторів у щільних ущільненнях були зняті приладом "Вібропорт" для двох перепадів тиску на ущільненнях ($\Delta P = 0,2$ МПа та $\Delta P = 0,3$ МПа).

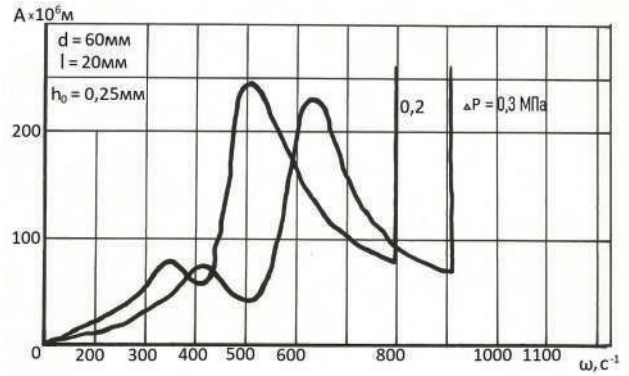


Рис. 6. АЧХ ротора № 2

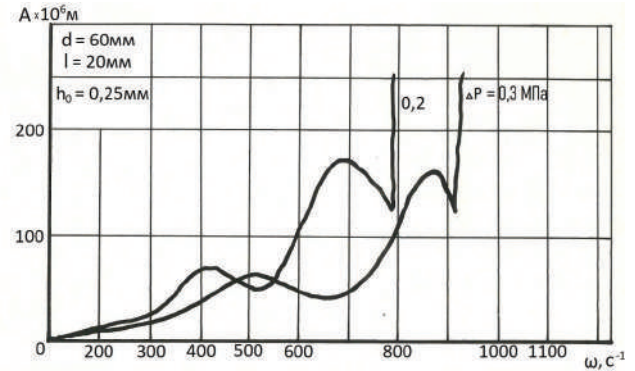


Рис. 7. АЧХ ротора № 3

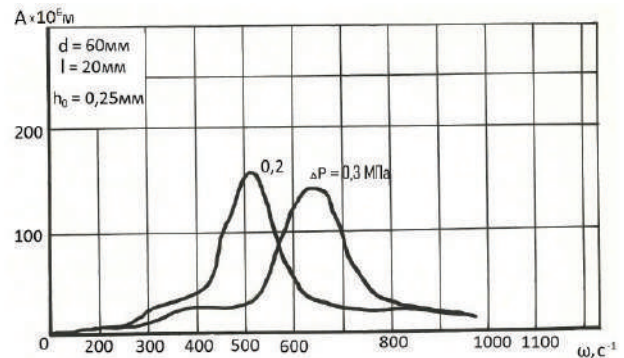


Рис. 8. АЧХ ротора № 2 в ущільненнях із знешкодженням вхідної закортки потоку

Аналіз АЧХ роторів № 2 і № 3 (мал. 6, мал. 7) вказує на наявність двох резонансних сплесків, що свідчить про існування критичних кутових швидкостей обертання для радіальних та кутових коливань. Для ротора – циліндра № 1 АЧХ (мал. 5) мала один максимум, що пояснюється близьким розташуванням критичних кутових швидкостей

Таблиця 1

Форма ротора	Маса, m , кг	Моменти інерції		$\frac{J_e}{J_o}$
		осьовий, J_o , $\times 10^{-3}$ кг м ²	екваторіальний, J_e , $\times 10^{-3}$ кг м ²	
Ротор - циліндр № 1	2,0	1,03	2,85	2,77
Ротор № 2	2,85	2,47	3,61	1,46
Ротор № 3	2,0	2,15	2,0	0,93

радіальних і кутових коливань, при цьому амплітуда кутових коливань значно перевершує радіальні й “поглинає” їх.

Форма синфазних сигналів з верхніх і нижніх струмових датчиків переміщення стенда (мал. 1, поз. 9) на екрані осцилографа С 1-68 свідчить про наявність низькочастотного резонансу радіальних коливань і більш високочастотного резонансу протифазних кутових коливань для роторів № 2, № 3. Для ротора – циліндра № 1 мав місце тільки кутовий резонанс.

У до критичній низькочастотній області кутових швидкостей ротори № 2, № 3 здійснюють вимушені радіальні коливання з наростаючою амплітудою (максимум амплітуди на критичній кутовій швидкості радіальних коливань $\omega_{екр.}$). У за критичній для радіальних коливань області спостерігається зниження амплітуд радіальних коливань, проявляється ефект самоцентрування ротора, коли останній прагне обернутися навколо осі, що проходить через центр мас. При подальшій підвищенні кутової швидкості обертання з'являються кутові коливання. Їхня амплітуда швидко наростає й досягає максимуму на критичній швидкості кутових коливань $\omega_{вкр.}$. При цьому на критичній швидкості кутових коливань і в безпосередній близькості від неї спостерігаються протифазні коливання, які свідчать про те, що геометрична вісь ротора здійснює конічний рух з нерухомою точкою практично на середині осі ротора. На критичній кутовій швидкості кутових коливань $\omega_{вкр.}$ ротор здійснює пряму синхронну конічну прецесію. В такому обертанні амплітуди коливань центрів ротора під ущільненнями значно перевершують амплітуди радіальних коливань на відповідній критичній кутовій швидкості радіальних коливань $\omega_{екр.}$. Цей факт пояснюється значно меншим демпфуванням кутових коливань у порівнянні з радіальними коливаннями. Робота – обертання ротора на кутових швидкостях близьких до кутового резонансу досить вібраційно активна й тому небажана. При подальшій підвищенні кутової швидкості обертання, тобто після переходу кутового резонансу, спостерігається зниження амплітуд кутових коливань ротора. Таке зниження має місце внаслідок кутового самоцентрування ротора, при якому останній прагне обернутися навколо однієї зі своїх головних осей інерції. Наступне зростання кутової швидкості обертання можливо до певної межі $\omega_{зр.}$, за якою настає різке, стрибкоподібне зростання амплітуди коливань ротора в ущільненнях, що приводить до обкатування останнього по поверхнях ущільнень. При цьому як на роторі, так і на статорних оболонках ущільнень, з'являються чітко виражені смуги натирання, а приводний електродвигун перевантажується. Несинхронна прецесія ротора з амплітудами, обмеженими тільки величиною зазору в ущільненнях, являє собою автоколивання, викликані неконсервативними циркуляційними силами, які ведуть до втрати ротором динамічної стійкості.

Зростання резонансних кутових швидкостей при збільшенні перепаду тиску рідини на ущільненнях підтверджує відомий факт залежності жорсткості ущільнень від перепаду на них тиску робочого середовища (Martsinkovskiy, 1980), (Martsinkovskiy & Vorona 1987),

(Martsinkovskiy, 2002). Слабкі зростання амплітуди коливань в області радіальних критичних кутових швидкостей свідчать про значне демпфірування радіальних коливань. Резонансні піки кутових коливань вельми суттєво перевищують радіальні, що свідчить як про достатньо мале сумарне кутове демпфірування, так і про перевагу динамічного дисбалансу над ексцентриситетом центру мас у випробуваних конструкціях роторів.

Обговорення (Discussion). Отримані експериментальним шляхом АЧХ роторів в ущільненнях дозволяють оцінити критичні кутові швидкості (фактично кутова швидкість прямо пов'язана із частотою обертання ротора) радіальних $\omega_{екр.}$ і кутових $\omega_{вкр.}$ коливань ротора. Також по експериментальним АЧХ легко визначається кутова швидкість $\omega_{зр.}$, на якій ротор втрачає динамічну стійкість і входить у режим автоколивань із обкатуванням по статорних оболонках ущільнень.

В роботах (Goroviy, 2017), (Gorovoi, 2019) автора даного дослідження приведені розрахункові формули для визначення власних кутових швидкостей радіальних ω_e і кутових ω_v коливань:

$$\omega_e = ((2 \cdot K_s) \cdot m^{-1})^{1/2} \quad (1)$$

$$\omega_v = \left(2 \cdot (-\alpha_e L - \beta_v + K_s L^2 + \bar{K}_s L) \cdot (2m_* L^2 + 2\bar{m}_* L + I_*)^{-1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

де $\alpha_e, \beta_v, K_s, \bar{K}_s, m_*, \bar{m}_*$ - вирази коефіцієнтів, наведені в роботах (Goroviy, 2017), (Gorovoi & Golovchenko, 2020), (Gorovoi, et al. 2021).

Величини власних ω_e , ω_v кутових швидкостей, розраховані по формулах (1), (2), і значення критичних $\omega_{екр.}$, $\omega_{вкр.}$ кутових швидкостей радіальних і кутових коливань роторів в ущільненнях, отримані по експериментальним АЧХ роторів в ущільненнях (мал. 5, 6, 7), зведено в таблицю 2.

Аналіз даних таблиці 1 і таблиці 2 дозволяє зробити висновок про те, що для роторів № 2 і № 3, у яких малий вплив гіроскопічного моменту, відносна погрішність між величинами критичних експериментальних і власних розрахункових кутових швидкостей як радіальних, так і кутових коливань не перевищує 6,3%.

Для ротора – циліндра № 1 ця відносна погрішність досягає 21%. Отриманий результат пояснюється істотним зниженням критичних швидкостей кутових коливань $\omega_{вкр.}$ за рахунок фактично негативного гіроскопічного моменту ротора. Для ротора - циліндра гіроскопічний момент суттєво знижує критичну кутову швидкість $\omega_{вкр.}$ стосовно власної кутової швидкості ω_v кутових коливань. Для роторів дискової конфігурації слід очікувати підвищення кутових критичних швидкостей. На величини критичних швидкостей радіальних коливань роторів їх конфігурація не створює істотного впливу.

Втрата ротором динамічної стійкості за даними робіт (Gorovoi, 2017), (Gorovoi, 2019) настає на кутових швидкостях обертання, які вдвічі перевищують

Таблиця 2

Форма ротора	ΔP , 10 ⁶ Па	ω_e , с ⁻¹	ω_v , с ⁻¹	$\omega_{екр.}$, с ⁻¹	$\omega_{вкр.}$, с ⁻¹	$\frac{\omega_e - \omega_{екр.}}{\omega_e} \times 100\%$	$\frac{\omega_v - \omega_{вкр.}}{\omega_v} \times 100\%$
Ротор - циліндр № 1	0,2 0,3	426 522	593 727	- -	470 590	--	21 19
Ротор № 2	0,2 0,3	362 443	530 650	365 415	525 630	-1 6,3	1 3
Ротор № 3	0,2 0,3	426 522	700 859	430 510	690 870	-1 2	1,5 -1,3

кутову швидкість власних радіальних коливань ротора в ущільненнях

$$\omega_{сп.} \geq 2 \cdot \omega_e \quad (3)$$

Кількісно легко визначити межу динамічної стійкості $\omega_{сп.}$ по експериментальним АЧХ роторів (мал. 5, 6, 7), як місця стрибкоподібного зростання кривої АЧХ після переходу через максимуми кутових коливань.

Величини кутових швидкостей власних радіальних коливань ω_e роторів, розраховані по формулі (1), і значення граничних кутових швидкостей $\omega_{сп.}$ роторів у щільних ущільненнях, отримані по експериментальним АЧХ роторів в ущільненнях (мал. 5, 6, 7), зведено в таблицю 3.

Згідно АЧХ роторів № 2 і № 3 (мал. 6, 7) втрата стійкості мала майже миттєвий характер. Амплітуда коливань лавиноподібно зростала при дуже незначній підвищенні кутової швидкості обертання роторів в малій ділянці $\omega_{сп.}$, при цьому верхні й нижні струмовихорові датчики переміщень (мал. 1, поз. 9) реєстрували розвинені автоколивання ротора, характерні для роботи ротора в режимі втрати ім динамічної стійкості до радіальних коливань.

Втрата роторами № 2 і № 3 динамічної стійкості мала місце на кутових швидкостях, близьких до подвоєної кутової швидкості власних радіальних коливань (мал. 6, 7 і таблиця 3), що добре узгоджується з розрахунком граничної кутової швидкості $\omega_{сп.}$ по формулі (3).

Ротор – циліндр № 1 також втрачав динамічну стійкість (мал. 5) на за критичних кутових швидкостях. При цьому зростання амплітуди коливань носило трохи затягнутий із зростанням кутової швидкості характер. Аналіз осцилограм сигналів з верхніх і нижніх струмовихорових датчиків переміщень (мал. 1, поз. 9) вказує на проти фазність коливань. Це свідчить про втрату ротором – циліндром № 1 динамічної стійкості до кутових коливань.

Втрата роторами №№ 1, 2, 3 динамічної стійкості викликається циркуляційними силами в ущільненнях, величина яких залежить від частоти обертання рідини перед ущільненням і по його довжині (Martsinkovskiy, 1980), (Martsinkovskiy & Vorona 1987), (Martsinkovskiy, 2002). Тому знешкодження закрутки потоку перед ущільненнями приводить до підвищення граничної по стійкості кутової швидкості обертання ротора.

Експериментальний стенд для динамічних випробувань був доповнений пристроями для знешкодження вхідної закрутки потоку перед ущільненнями (мал. 1, поз. 8). Випробування ротора № 2 у таких модернізованих ущільненнях показали, що у всім робочому діапазоні кутових швидкостей обертання ротора (від 0 до 980 с-1) втрата динамічної стійкості не відбувалась. Також суттєво зменшилися амплітуди радіальних і кутових коливань на критичних кутових швидкостях $\omega_{екр.}$ і $\omega_{вкр.}$ (мал. 8).

Висновки (Conclusions). Отримані на експериментальному стенді АЧХ роторів насосів різної геометричної конфігурації дозволяють стверджувати про самоцентрування роторів в ущільненнях в широкому діапазоні кутових швидкостей до втрати динамічної стійкості.

Дані аналізу експериментальних АЧХ роторів в ущільненнях слугують підтвердженням прийнятності формул робіт (Gorovoi, 2017), (Gorovoi, 2019), (Gorovoi & Golovchenko, 2020), (Gorovoi, et al. 2021) для розрахунку силових факторів в ущільненнях, обчислення власних кутових швидкостей радіальних і кутових коливань роторів у безконтактних опорах – ущільненнях та оцінки межі динамічної стійкості самоустановлювального в ущільненнях ротора.

Стабільна робота самоустановлювального в ущільненнях ротора з малими амплітудами радіальних і кутових коливань забезпечується на кутових швидкостях

Таблиця 3

Форма Ротора	ΔP , 10 ⁶ Па	ω_e , с ⁻¹	$\omega_{сп.}$, с ⁻¹	$2 \cdot \omega_e$, с ⁻¹	$\frac{2 \cdot \omega_e - \omega_{сп.}}{2 \cdot \omega_e} \times 100\%$
Ротор - циліндр № 1	0,2 0,3	426 522	1000 1150	852 1044	-17 -10
Ротор № 2	0,2 0,3	362 443	800 920	724 886	-10 -4
Ротор № 3	0,2 0,3	426 522	790 930	852 1044	7 11

обертання до критичної швидкості $\omega_{\text{вкр}}$ кутових коливань.

Експериментальним шляхом була підтверджена можливість розширення області динамічної стійкості й поліпшення вібраційних характеристик самоустановлювального в ущільненнях ротора шляхом цілеспрямованого зменшення закрутки потоку на вході в ущільнення.

При створенні конструкцій відцентрових насосів із самоустановлювальним у щілинних опорах – ущільненнях робочим колесом слід віддати перевагу дисковій геометричній конфігурації ротора (з перевагою еквато-

ріального J_{ρ} , моменту інерції над осьовим J_o моментом інерції). Дискова конфігурація забезпечує менші амплітуди радіальних і кутових коливань на критичних кутових швидкостях і зміщує максимум кутових коливань в бік високих кутових швидкостей. На перехідних режимах обертання ротора насоса, коли гідродинамічні сили в ущільненнях не забезпечують надійне центрування ротора, останній працює з тертям по статорних оболонках ущільнень. Тому доцільне використання спеціальних зносостійких покриттів на роторних поверхнях ущільнень.

Бібліографічні посилання:

1. Martsinkovskiy, V.A. (2002) Vibratsii rotorov tsentrobeznykh mashin: v 2-h knigax. Kniga 1. Gidrodinamika drosseliruyuschih kanalov [Vibrations of rotors of centrifugal machines: in 2 books. Book 1. Hydrodynamics of throttling channels]. Izdatelstvo SymDU, 337 p., Sumy (in Ukrainian).
2. Goroviy, S.O. (2017) Otsinochniy gidravlichnyy rozrahunok silovih momentiv shparinnogo uschilnennya [Estimated hydraulic calculation of power moments of gap sealing]. Visnik SNAU, Ceriya: "Mehanizatsiya ta avtomatyzatsiya virobnichih protsesiv", № 10 (32), P. 20 - 23, Sumy (in Ukrainian).
3. Gorovoi, S.A. (2017) Hydrodynamic Calculation of Bearing - Seal Assemblies of Centrifugal Pump with Self - Adjusting Rotor. Chemical and Petroleum Engineering, № 53, P. 171 - 175.
4. Gorovoi, S.A. (2019) Bench Testing of a Pump with a Self - Adjusting Impeller. Chemical and Petroleum Engineering, № 55, P. 149 - 157.
5. Gorovoi, S.A. & Golovchenko, G.S. (2020) Refined Model of a Groove Seal and Calculation of Angular Hydrodynamic Force Coefficients. Impeller Chemical and Petroleum Engineering, Volume 56, Nos. 3, P. 205 - 214.
6. Gorovoi, S.A., Golovchenko, G.S. & Dumanchuk, M.U. (2021) Determination of angular stiffness coefficient of the annular seal by experimental - calculation. Journal of Physics: Conferens Series, mechanical, annular and magnetic fluid seals, Volume 1741, P. 1 - 12.
7. Shkelov, L.T., Stankevych, A.M. & Poshyvach, D.V. (2011) Opir materialiv: Pidruchnyk dlia studentiv vyshchikh navchalnykh zakladiv. [Resistance of materials: Textbook for students of higher educational institutions]. K.: ZAT "Vipol", 456 p.

Gorovoy S.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Golovchenko G.S., Senior Lecturer, Sumy National University Sumy, Ukraine

Dynamic tests rotors pump of cylindrical and disk configuration in slotted seals

Centrifugal pumps are used in a wide variety of industries and agriculture in all countries of the world. In connection with the widespread use of centrifugal pumps, the issues of working out their design schemes, which provide high indicators of durability and vibration reliability, continue to be relevant. Hydrodynamic forces in the gap seals of the pumps have a significant effect on the vibration activity of the rotor as a whole. Significant hydrodynamic forces in the gaps of non-contact seals of centrifugal pumps can lead to a loss of dynamic stability of the rotor and self-oscillations of the rotor (which is unacceptable), and vice versa - to significantly reduce the vibration activity of the rotor in the seals. Theoretical and experimental studies by various authors allowed to establish the structure of hydrodynamic forces and to determine the values of radial force coefficients. There was a need for further practical research in order to obtain reliable information about the influence of the geometric shape of the rotor on its ability to self-center in seals at different angular speeds of rotation, up to the loss of the rotor's dynamic stability. On a specially created laboratory experimental stand, the authors of this work obtained the amplitude frequency characteristics (frequency response) of forced radial-angular oscillations of self-aligning in slotted seals of pump rotors of cylindrical and disk geometric configurations at different pressure drops of the working fluid on the seals. Amplitude frequency characteristics of forced radial-angular vibrations of the rotor were also obtained with neutralization of the swirl of the working fluid at the entrance to the seal. The frequency response of the rotors obtained experimentally made it possible to determine the critical angular velocities of the radial and angular oscillations of the rotors in the seals, as well as the limits of their dynamic stability. The angular velocities of the inherent radial and angular oscillations of the rotor in the seals, as well as the limits of their dynamic stability, were calculated according to theoretical formulas. Comparison of theoretical and experimental values indicates their good quantitative agreement. A conclusion is drawn regarding the higher dynamic stability of the rotor of the disc geometric configuration compared to the cylindrical configuration. When designing centrifugal pumps with an impeller self-installing in slot supports - seals, one should strive for a disk geometric configuration of the impeller.

Key words: centrifugal pump, slot seal, rotor pump, self-aligning rotor, hydrodynamic forces, fluid pressure, radial - angular vibrations of the rotor in slot seals, dynamic stability of the rotor, amplitude frequency response of the rotor in slot seals.

МОБІЛЬНИЙ ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИКИДІВ ДВООКИСУ ВУГЛЕЦЮ З ҐРУНТУ

Коваленко Юрій Сергійович

PhD студент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-1248-6311

yuriy.kovalenko1981@gmail.com

Шелест Микола Сергійович

PhD студент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0001-5722-8944

koladj1992@gmail.com

Рапута Вадим Валерійович

PhD студент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-1016-1601

V.raputa89@gmail.com

Панкова Оксана Володимирівна

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

ORCID: 0000-0003-2866-1858

pankova_oksana@ukr.net

Щербина Тетяна Володимирівна

кандидат економічних наук, доцент

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0001-5978-3255

t.shcherbvna@uabs.sumdu.edu.ua

Зубко Владислав Миколайович

доктор технічних наук, професор

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-2426-2772

zubkovladislav@ukr.net

Ґрунти є головним наземним резервуаром органічного вуглецю (CO). Вивільнення двоокису вуглецю (CO₂) у процесі дихання ґрунту, в основному пов'язане з розкладанням органічної речовини в ґрунті, є другим за величиною компонентом глобального вуглецевого циклу і може відігравати важливу роль у зміні клімату. Залежно від сільськогосподарської практики управління ґрунтом ґрунту можуть бути важливими джерелами або поглиначами атмосферного вуглецю з відповідними наслідками та наслідками у глобальному масштабі.

Встановлено, що виділення вуглекислого газу (CO₂) при диханні ґрунту процеси, пов'язані з життєдіяльністю біологічних організмів в ґрунтах є другим за величиною компонентом глобального циклу вуглецю.

Залежно від технологій обробки ґрунту, які використовують в аграрному виробництві, ґрунти можуть бути важливим джерелами або поглиначами атмосферного вуглецю, що може бути інструментом корегування викидів з ґрунту. Наприклад, технології Mini-Till, які перебивають рештки і заробляють їх на мінімальну глибину мають негативний вплив на рівень викидів CO₂ в навколишнє середовище.

No-Till технології менше працюють з рослинними рештками і тому в навколишнє середовище менше викидів CO₂.

Обмін CO₂ між орними ґрунтами та атмосферою — лише один із аспектів складності вуглецевого бюджету агроєкосистеми. Тим не менш, необхідні точні вимірювання викидів CO₂, щоб оцінити, чи є метод управління рослинництвом кращим, ніж інший, у зниженні викидів CO₂ з ґрунту.

Для оцінки обміну використовується метод статичної камери, який буде спрямований на дослідження потоків CO₂ із оброблюваного ґрунту у зоні інтенсивного землеробства, наприклад, на півдні України. більшість вчених використовують таку умовну одиницю для виміру викидів CO₂ як ppm/хв. Вимірювання потоків CO₂ у ґрунті будуть проведені на одному з полів соняшника, керованих з використанням різних методів обробки ґрунту, та представлені для отримання параметрів для моделювання обміну CO₂ між ґрунтом та атмосферою.

Розроблений прилад має широкий функціонал застосування. Він може бути використаний, як для дрібних досліджень у межах конкретного господарства. Так і використаний для участі у глобальній програмі Carbon Farming від Bayer, яка включає Лабораторію вуглецевого землеробства, Цифрове землеробство та Центр декарбонізації. В сучасних умовах війни екологічні показники в Україні мають критично низькі значення і зменшення тиску кожного параметра на навколишнє середовище вплине – задача кожного науковця.

Ці дослідження проводились спільно з компанією Lozova Machinery (виробник аграрної техніки).

Ключові слова: carbon, the size of the remains, the percentage of earnings, the working body of the agromachine.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.5>

Вступ. В останні роки проблема забруднення атмосфери викидами CO₂ постає все більш гостро. Світові лідери все частіше замислюються про забруднення атмосфери двоокисом вуглецем та іншими парниковими газами. Так, на Ехро 2020 було створено декілька сценаріїв для зменшення забруднення (*Ехро 2020 Dubai Sustainability Report 2018*).

Роль сільського господарства у викидах парникових газів широко відома, але недостатньо зрозуміла. Понад чверть світових викидів парникових газів припадає на сільське та лісове господарство та зміни землекористування. Якщо на них активно не звернути увагу, вони збільшуватимуться, оскільки Землю заселятиме більше людей і потреба в їжі продовжує зростати. Глобальне потепління на 1,5°C, звіт Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC) за 2018 рік, чітко пояснює, що потрібен «швидкий і далекосяжний» перехід, щоб обмежити вплив зміни клімату до 1,5 градусів за Цельсієм.

Для цього потрібно залишитися в межах сукупного вуглецевого бюджету в 570 гігатонн вуглекислого газу (GtCO₂), досягти нульових викидів вуглекислого газу в усьому світі приблизно до 2050 року та значно скоротити викиди інших газів, включаючи метан і закис азоту. Обмеження впливу зміни клімату до 1,5 градусів за Цельсієм означало б значні зміни для сільського господарства — від того, як ми ведемо ферму, до того, як ми їмо та витрачаємо їжу. Досягнення цих великих змін може бути більш складним для сільського господарства, ніж для інших секторів. Наприклад, в електроенергетиці вугілля і газ можна замінити вітром, сонцем і акумулюванням.

Слід зауважити, що аграрне виробництво також є джерелом, яке проводить викиди CO₂ у навколишнє середовище. До джерел викидів аграрного виробництва слід віднести галузі тваринництва та рослинництва. Аналізуючи галузь рослинництва встановлено, що ґрунт – основний резервуар органіки, який включає в три рази більше вуглецю ніж біомаса рослин (Fischlin et al., 2007). Обмін CO₂ між орними ґрунтами та атмосферою є лише одним із аспектів складності вуглецевого бюджету агро-екосистеми. Але дуже важливим для формування біологічної маси рослин та формування затратної частини при її вирощуванні (Gerosa et al., 2014).

Встановлено, що виділення вуглекислого газу (CO₂) при диханні ґрунту процеси, пов'язані з життєдіяльністю біологічних організмів в ґрунтах є другим за величиною компонентом глобального циклу вуглецю (Schlesinger & Andrews, 2000; Silva-Olaya et al., 2013).

Залежно від технологій обробітку ґрунту, які використовують в аграрному виробництві, ґрунти можуть

бути важливим джерелами або поглиначами атмосферного вуглецю, що може бути інструментом корегування викидів з ґрунту (Lal, 2004; Lal, 2001; Mosier, 1998). Наприклад, технології Mini-Till, які перебивають рештки і заробляють їх на мінімальну глибину мають негативний вплив на рівень викидів CO₂ в навколишнє середовище (Reicosky, 2003; Reicosky et al., 2008).

No-Till технології менше працюють з рослинними рештками і тому в навколишнє середовище менше викидів CO₂ (Scala et al., 2008; Sanchez et al., 2002; Bayer et al., 2000; Lal & Logan, 1995).

В аграрному виробництві проблема забруднення атмосфери викидами вуглекислого газу також є надзвичайно актуальною, оскільки вуглець – один з головних елементів, що входять до складу гумусу. Інтенсифікація землеробства призводить до того, що кількість родючого шару землі зменшується.

Таким чином, вуглець, що як вже було зазначено міститься у гумусі, вивільняється і при потраплянні в атмосферу та поєднанні з киснем утворює CO₂. Зменшити забруднення можна лише шляхом екологізації аграрного виробництва (Riuter & Kanevskyi, 2020).

Точні вимірювання витоків CO₂ необхідні для оцінки того, чи є методика управління врожаєм кращою, ніж інша у зменшенні викидів CO₂ з ґрунтів (Gerosa et al., 2014).

Ці дослідження проводились спільно з компанією Lozova Machinery (виробник аграрної техніки).

Тому, метою нашого дослідження стали прилади, які допомагають вимірювати викиди CO₂ з ґрунтового середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задля дослідження викидів діоксиду вуглецю в атмосферу вченими з усього світу використовуються різні прилади та методики.

Так, наприклад, в екології у дослідженнях емісії CO₂ в підстилці лісових фітоценозів використовувався камерно-статистичний метод та замкнена система для вимірювання концентрації вуглекислого газу CO650 Plant CO₂ Analysis Package K7M 3X9 Qubit Systems inc., Canada (Vyshenska & Rudko, 2018).

Тоді як в агрокультурі здебільш використовують інші прилади і методи. Для прикладу, в досліді з вивчення забруднення CO₂ під різними аграрними рослинами використовували портативний газоаналізатор Testo 535 із інфрачервоним зондом (Siabruk, 2015). А в дослідженнях, що проводились на базі Інституту сільського господарства Карпатського регіону НААН для вимірювання рівня викидів діоксиду вуглецю було використано газоаналізатор K-30 Probe. Цікавим є той факт, що біль-

шість вчених використовують таку умовну одиницю для виміру викидів CO₂ як ppm/хв, тоді як вчені цього Інституту більш схильні до використання інших одиниць. Тому у своїй роботі вони наводили метод Макарова, та навели формулу (формула 1) за допомогою якої ppm/хв можна перетворити у мг CO₂/м² (Германович, 2018).

$$V_{\text{мг CO}_2 / \text{м}^2} = (i * t * v / S) * M_{\text{CO}_2} / NA, \quad (1)$$

де V мг CO₂/м² – швидкість виділення CO₂;
 i – інтенсивність виділення CO₂ у ppm/хв;
 t – час експозиції (хв);
 v – об'єм камери (мл);
 S - площа поверхні основи камери (м²);
 NA - стала Авогадро;
 M_{CO_2} – молекулярна маса CO₂.

Оцінювання забруднення парниковими газами із ґрунтів агроєкосистем можна здійснювати завдяки моделі plant-agrosoil-GHG-model, що є комплексною. Завдяки використанню цієї моделі можна провести безліч експериментів із кількісної оцінки впливу певних факторів довкілля на викиди парникових газів (в т.ч. і CO₂) (Polovyj & Bozhko, 2021).

Постановка завдання. Обґрунтування параметрів мобільного приладу для вимірювання емісії двоокису вуглецю з ґрунту, що дозволить проводити порівняння викидів CO₂ після проведення обробітку ґрунту.

Матеріали і методи дослідження. Оскільки, однією із цілей сталого розвитку є боротьба зі зміною клімату (Sustainable development goals), а двоокис вуглецю - один із видів парникових газів. Було вирішено створити прилад, що дозволяє вимірювати викиди CO₂ після проведення будь-яких технологічних операцій. Чому ми вважаємо, що проведення вимірів допоможе зменшити викиди вуглекислого газу в атмосферу? Та тому, що після проведення вимірювань, досліджень та певного аналізу можна буде запропонувати альтернативний тип обробітку ґрунту (з меншими викидами CO₂), але при цьому зберегти технологічну лінію обробки.

З цією метою розроблений мобільний прилад для вимірювання інтенсивності викидів CO₂ у навколишнє середовище (Рисунок 1 та 2).

Конструктивні особливості, а саме, його портативність, можливість швидкого монтажу та демонтажу, мінімізація впливу навколишніх факторів на інтенсивність викидів CO₂, можливість запису інформації та передачі



Рис. 1. Загальний вигляд мобільного приладу для виміру інтенсивності викидів CO₂ з ґрунту.



Рис. 2. Загальний вигляд блоку-аналізатора для виміру інтенсивності викидів CO₂ з ґрунту.

її на віддалі робить його унікальним у використанні. Прилад складається з камери-накопичувача (її об'єм дорівнює 16,5 л), яка ізолювана від впливу навколишнього середовища. Блока аналізатора, до складу якого входить інфрачервоний датчик-аналізатор рівня CO₂, датчика температури та вологості повітря. В блок-аналізатор вмонтовано Bluetooth, карта пам'яті, слот для сім-карти мобільного оператора та портативні елементи живлення. Назовні встановлений датчик температури вологості повітря також. Для ефективності аналізу прилад укомплектовано щільним покритвом.

Мобільний пристрій, що дозволяє вимірювати рівень викидів CO₂ із ґрунту складається із таких компонентів (Табл. 1):

Робота приладу. Після проведення обробітку поверхня ґрунту накривається щільним покритвом. Це не дає інтенсивно випаровуватись CO₂, перегріватись ґрунту, і вивіюватись CO₂ з ґрунту вітром. Паралельно з цим, є можливість проводити аналіз якості виконання механізованих технологічних операцій: ступінь подрібнення рослинних решток, інтенсивність перемішування решток з ґрунтом, рівномірність обробітку ґрунту по глибині, вирівняність поверхні поля. Ці додаткові параметри слугують обґрунтуванням використання тієї чи іншої машин в технології поверхневого обробітку ґрунту та вплив машини на навколишнє середовище.

В центр покритву встановлюється на ґрунт прилад, накривається ізолюваною колбою, яка ізолюється від випаровування з середини газів. Для коректного вимірювання виділення двоокису вуглецю із ґрунту колбу, що

містить датчик МН-Z19 встановлюється так, щоб не було доступу повітря ззовні, для цього її обкопують та при-трамбовують ґрунт навколо неї. Колба має спеціальний шар утеплювача задля забезпечення мікроклімату в ній незалежно від зовнішніх чинників. Об'єм колби 16,5 л, для простішого обчислення отриманих даних. Після встановлення колби відповідно до вимог відбувається вимірювання викидів вуглекислого газу протягом часу, що дослідник обере сам, адже автономність робот пристрою складає до 24 годин.

Висновки. Розроблений прилад має широкий функціонал застосування. Він може бути використаний, як для дрібних досліджень у межах конкретного господарства. Так і використаний для участі у глобальній програмі Carbon Farming від Bayer, яка включає Лабораторію вуглецевого землеробства, Цифрове землеробства та Центр декарбонізації. В сучасних умовах війни екологічні показники в Україні мають критично низькі значення і зменшення тиску кожного параметра на навколишнє середовище вплине – задача кожного науковця.

Подяка (Acknowledgment): Ми вдячні чеській урядовій підтримці, наданій Міністерством закордонних справ Чеської Республіки, яка дозволила розпочати цю наукову співпрацю в рамках проекту «Підвищення потенціалу аспірантів для якісних досліджень в Україні» (We are thankful to the Czech government support provided by the Ministry of Foreign Affairs of the Czech Republic, which allowed this scientific cooperation to start within the project "Enhancement of the PhD Students Potential For Qualitative Research In Ukraine").

Таблиця 1

Перелік компонентів мобільного CO₂-метра

№ з/п	Назва модулю	Функція модулю
1.	Arduino nano	Мікроконтролер, що дозволяє зібрати дані із датчиків, сенсорів та модулів. Опрацьовує, зберігає і передає дані на передатчики.
2.	MH-Z19	Датчик, що дозволяє визначити рівень CO ₂ .
3.	GY-21	Використовується для визначення рівня вологості повітря, а також температури у колбі, де вимірюють рівень двоокису вуглецю
4.	DHT-21	Використовується для вимірювання вологості повітря і температури навколишнього середовища.
5.	SIM800L	GSM-модуль для передачі інформації за запитом через СМС чи Інтернет.
6.	DS3232	Модуль-годинник, що відповідає за синхронізацію часу.
7.	HC-05	Bluetooth-модуль, що дозволяє отримувати інформацію про рівень вуглекислого газу безпосередньо біля колби.

Бібліографічні посилання:

1. Sanchez M. L., Ozores M. I., Colle R. et al. (2002). Soil CO₂ fluxes in cereal land use of the Spanish plateau: influence of conventional and reduced tillage practices. *Chemosphere*, vol. 47, no. 8, pp. 837–844.
2. Bayer C., Mielniczuk J., Amado T. J. C., Martin-Neto L., and Fernandes S. V. (2000). Organic matter storage in a sandy clay loam acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, vol. 54, no. 1-2, pp. 101–109.
3. Expo 2020 Dubai Sustainability Report 2018. (2021). Dubai, www.expo2020dubai.com/-/mepdia/expo2020/sustainability/expo2020-sustainability-report-2018-en.pdf.
4. Fischlin A., Midgley G. F., Price J. et al. (2007). Ecosystems, their properties, goods, and services. in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, and C. E. Hanson, Eds., pp. 211– 272, Cambridge University Press, Cambridge, UK,

5. Gerosa G., Finco A., Boschetti F., Brenna S., and Marzuoli R. (2014). Measurements of Soil Carbon Dioxide Emissions from Two Maize Agroecosystems at Harvest under Different Tillage Conditions., *Scientific World Journal*, Hindawi Publishing Corporation. Volume 2014, Article ID 141345, 12 p.
6. Hermanovych O. (2018). Emisiia dioksydu karbonu gruntom za riznykh system udobrennia i vapnuvannia v ahrobiehoetsenozakh opilla. [Emission of carbon dioxide through soil under different fertilization and liming systems in agro-biogeocenoses of opilla] Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata silskohospodarskykh nauk. (in Ukrainian).
7. La Scala N., Bolonhezi D., and Pereira G. (2006). Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in Southern Brazil," *Soil and Tillage Research*, vol. 91, no. 1-2, pp. 244–248.
8. Lal R. (2001). World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, vol. 71, pp. 145–191.
9. Lal R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change," *Geoderma*, vol. 123, no. 1-2, pp. 1–22.
10. Lal R. and Logan T. (1995) Agricultural activities and greenhouse gas emissions from soils of the tropics. in *Soil Management and Greenhouse Effect*, pp. 293–307.
11. Mosier A. R. (1998). Soil processes and global change. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 27, no. 3, pp. 221–229.
12. Polovyi A., Bozhko L. (2021). Modeliuvannia dynamiky emisiiiparnykovykh haziv (CO₂, N₂O) iz hruntiv ahroekosystem [Modeling the dynamics of emissions of greenhouse gases (CO₂, N₂O) from the soils of agroecosystems]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetuimeni V.N. Karazina. Seriia «Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia»*, vol. 54, pp. 329-344. (in Ukrainian).
13. Reicosky D. (2003). Tillage-Induced CO₂ Emissions and Carbon Sequestration: Effect of Secondary Tillage and Compaction. Springer.
14. Reicosky D. C., Gesch R. W., Wagner S. W., Gilbert R. A., Wente C. D., and Morris D. R. (2008). Tillage and wind effects on soil CO₂ concentrations in muck soils," *Soil and Tillage Research*, vol. 99, no. 2, pp. 221–231.
15. Riuter G., Kanevskyi D. (2020). Silske hospodarstvo: yak peretvoryty ubyvtysiu klimatu na yoho zakhysnyka? [Agriculture: how to turn a climate killer into its protector]. *Deutsche Welle*, 14.10.2020. <https://www.dw.com/uk/silskohospodarstvo-iaak-peretvoryty-ubyvtysiu-klimatu-na-ioho-zakhysnyka/a-55261868>. (in Ukrainian).
16. Schlesinger W. H. and Andrews J. A. (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, vol. 48, no. 1, pp. 7–20.
17. Siabruk O. (2015). Udoskonalennia instrumentalnoho metodu kontroliu emisii CO₂ z poverkhni hruntu. [Improvement of the instrumental method of controlling CO₂ emissions from the soil surface]. *Ahrokhimiia i gruntoznavstvo*, vol. 84, 2015, pp. 123-128. (in Ukrainian).
18. Silva-Olaya A. M., Cerri C. E. P., Scala N. La Jr., Dias C. T. S., and Cerri C. C. (2013). Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environmental Research Letters*, vol. 8, no. 1, Article ID 015014
19. Sustainable development goals. *UNDP* <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>.
20. Vyshenska I., Rudko M. (2018). Emisiia CO₂ gruntu i pidstylky lisovykh fitotsenoziv riznoho typu [Emission of CO₂ from soil and litter of forest phytocenoses of various types]. *Naukovi zapysky NaUKMA. Biolohiia ta ekolohiia*, vol. 1, pp. 43-47. (in Ukrainian).

Kovalenko Yu. S., PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Shelest M. S., Assistant Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Raputa V. V., PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Pankova O. V., Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

Shcherbyna T. V., Candidate of Economic sciences, Associate Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Zubko V. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

A mobile device for measuring carbon dioxide emissions from the soil

Soils are the main terrestrial reservoir of organic carbon (CO). The release of carbon dioxide (CO₂) through soil respiration, mainly due to the decomposition of organic matter in the soil, is the second largest component of the global carbon cycle and may play an important role in climate change. Depending on agricultural soil management practices, soils can be important sources or sinks of atmospheric carbon, with corresponding impacts and consequences on a global scale.

It has been established that the release of carbon dioxide (CO₂) during soil respiration, processes associated with the vital activity of biological organisms in soils, is the second largest component of the global carbon cycle.

Depending on the tillage technologies used in agricultural production, soils can be important sources or sinks of atmospheric carbon, which can be a tool for correcting emissions from the soil. For example, Mini-Till technology, which breaks up the remains and cultivates them to a minimum depth, has a negative impact on the level of CO₂ emissions into the environment.

No-till technologies work less with plant residues and therefore emit less CO₂ into the environment.

The exchange of CO₂ between arable soils and the atmosphere is only one aspect of the complexity of the carbon budget of the agroecosystem. However, accurate measurements of CO₂ emissions are needed to assess whether one crop management method is better than another in reducing CO₂ emissions from the soil.

The static camera method is used to evaluate the exchange, which will be aimed at researching CO₂ flows from cultivated soil in an area of intensive agriculture, for example, in the South of Ukraine. Most scientists use the conventional unit to measure CO₂ emissions as ppm/min. Measurements of CO₂ fluxes in the soil will be carried out in one of the sunflower fields

managed using different tillage methods and presented to obtain parameters for modeling the exchange of CO₂ between the soil and the atmosphere.

The developed device has a wide application functionality. It can be used as for small studies within a specific farm. It is also used to participate in Bayer's global Carbon Farming program, which includes the Carbon Farming Laboratory, Digital Farming and the Decarbonization Center. In modern conditions of war, ecological indicators in Ukraine have critically low values, and reducing the pressure of each parameter on the environment will affect it - the task of every scientist.

These studies were carried out jointly with the Lozova Machinery company (manufacturer of agricultural machinery).

Key words: carbon, the size of the remains, the percentage of earnings, the working body of the agromachine.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ЩОДО РАЦІОНАЛЬНОГО ВЕДЕННЯ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ САХАРОЗИ ОХОЛОДЖЕННЯМ

Мирончук Валерій Григорович

доктор технічних наук, професор
Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-2291-3930
mironchukvg@ukr.net

Самілик Марина Михайлівна

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-4826-2080
maryna.samilyk@snau.edu.ua

Назаренко Юлія Валентинівна

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0003-4870-4667
nazarenko.sumy@gmail.com

Сабадаш Сергій Михайлович

кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-0371-8208
s.v.sabadash@ukr.net

Меляса є побічним продуктом бурякоцукрового виробництва, який містить від 40 до 60% сахарози. Встановлення умов досягнення максимально можливого виходу цукру високої якості з мінімальними втратами сахарози в мелясі є важливим завданням для виробників цукру та науковців. Показано, що застосування розкачок утфелю останнього ступеня кристалізації водою в перемішувачах-кристалізаторах не забезпечує досягнення максимального ефекту кристалізації внаслідок порушення ізогідричних умов процесу. Метою даного дослідження є розробка раціонального способу проведення процесу політермічної кристалізації сахарози утфелю останнього продукту. В статті представлено схеми установок для промислової кристалізації утфелю, які використовуються в різних країнах світу. Надано рекомендації промисловості щодо раціонального ведення процесу кристалізації сахарози утфелю останнього ступеня кристалізації в перемішувачах-кристалізаторах шляхом охолодження. З метою забезпечення ізогідричних умов процесу запропоновано замість розкачок утфелю останнього ступеня кристалізації водою здійснювати його проміжне нагрівання на 7-10°C після охолодження утфелю до 50-55°C. При визначенні режиму політермічної кристалізації було враховано чистоту утфелю останнього ступеня кристалізації після вакуум-апарату. Запропонований спосіб політермічної кристалізації сахарози реалізується шляхом оснащення машино-апаратної схеми станції додаткової кристалізації утфелю останнього ступеня кристалізації спеціальними нагрівачами для проміжного нагрівання утфелю у відповідності до особливостей компоновки таких схем на конкретному підприємстві. Проміжне нагрівання забезпечує більш повне виснаження меляси й збільшує вміст і гранулометричний склад кристалів цукру в утфелі. Представлено приклад компоновки машино-апаратної схеми додаткової кристалізації сахарози оснащеної двома вертикальними кристалізаторами з використанням проміжного нагрівання утфелю.

Ключові слова: сахароза, цукор, промислове виробництво, кристалізація охолодженням, проміжне нагрівання, утфель, меляса, відходи виробництва.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.6>

Вступ. Промисловим виробництвом цукру у світі займаються більше 150 років. Не дивлячись на це, технологія його виробництва залишається однією із найскладніших серед існуючих харчових технологій. Це пов'язано зі складністю процесів, які використовуються в цій технології.

Промислова кристалізація цукру є енергоємним процесом, на який припадає значна частина загаль-

них витрат виробництва (Shamim et al., 2016). Економічно ефективне масове виробництво цукру, потребує сучасного обладнання та автоматичного контролю (Rozsa, 2011).

Для проведення кристалізації у промислових умовах застосовуються такі види обладнання: вакуум-апарати, кристалізатори та центрифуги. У вакуум-апаратах формуються і ростуть кристали цукру при постійній

температурі з періодичною подачею підкачок сиропу. У кристалізаторах зростання кристалів відбувається за рахунок охолодження утфелю, що збільшує пересичення (Gonzales et al., 2020).

Велике значення має також спосіб проведення процесу кристалізації (Kim et al., 2023). В практиці цукрового виробництва застосовують два способи ведення процесу кристалізації: шляхом випаровування розчинника в умовах кипіння цукрового розчину у вакуум-апаратах та шляхом охолодження цукрової дисперсної системи (утфелю) останнього ступеню кристалізації в перемішувачах-кристалізаторах. Від ефективності цих процесів залежить величина втрат сахарози у вторинному продукті (мелясі), який є відходом виробництва.

Контроль пересичення або контроль температури є одним із способів контролю розподілу кристалічних частинок через процес кристалізації періодичного охолодження (Samad et al., 2013). Дослідженням процесу кристалізації охолодженням було присвячено велика кількість досліджень, на основі яких запропоновані різні варіанти режимів кристалізації охолодженням (Höving et al., 2022; Schmalenberg et al., 2021; Schmalenberg et al., 2022). Дослідження періодичної кристалізації сахарози охолодженням з високов'язкого водного розчину показало, що достатня кількість використаної затравки ефективно впливає на недопущення вторинного кристалізаційного процесу (Doki et al., 2022).

Під час кристалізації в мішалках-кристалізаторах необхідне для кристалізації пересичення сахарози досягається охолодженням, при цьому тепло- і масообмін на поверхні кристалів залежить від багатьох чинників, взаємопов'язаних між собою (Самілик, 2018). Ефективність додаткової кристалізації підвищується при застосуванні водних розкачок, але при цьому слід чітко дотримуватися режиму розкачування та проводити складні математичні розрахунки для визначення величини розкачки при різних якісних показниках утфелю. У виробничих умовах не завжди такі виконуються і бажані результати ефекту кристалізації не досягаються (Mugonchuk et al., 2013).

Розроблено ряд заходів щодо оптимізації кристалізації охолодженням, проте, відсутні дані щодо раціонального способу проведення додаткової кристалізації у промислових умовах, який дозволить інтенсифікувати процес та мінімізувати втрати сахарози в мелясі.

Метою даного дослідження є розробка раціонального способу проведення процесу кристалізації сахарози утфелю останнього продукту.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні задачі:

- провести аналіз ефективності апаратурно-технологічних схем для проведення кристалізації охолодженням;
- надати рекомендації щодо раціонального ведення процесу кристалізації сахарози охолодженням у виробничих умовах;
- розробити апаратурно-технологічну схему для реалізації запропонованого режиму.

Матеріали і методи досліджень. Експериментальна частина досліджень по кристалізації утфелю останнього

продукту, проводилася за допомогою лабораторної установки (Mugonchuk et al., 2013). Промислові дослідження було проведено на виробничих потужностях ТОВ «Ук. Аз.-Дружба» (Жовтневий цукровий завод).

Викладення основного матеріалу дослідження.

На більшості цукрових заводів практикується режим кристалізації, при якому утфель після вакуум-апарату із вмістом сухих речовин 94-95% розбавляється певною кількістю води в мішалках і охолоджується до 40-45°C. водні розкачки призводять до збільшення вмісту сахарози в мелясі. На сьогодні існує цілий ряд різновидів апаратурно-технологічних схем кристалізації сахарози охолодженням утфелю останньої ступені кристалізації в перемішувачах-кристалізаторах.

За останні роки найбільшого поширення набули схеми оснащені перемішувачами-кристалізаторами ємністю 150-800 м³. Серед них вітчизняні Ш1-ПКВ, ТМА-КВ, ТКВ. Вітчизняні станції кристалізації сахарози охолодженням утфелю останнього продукту в основному комплектуються за вертикальними, горизонтальними та комбінованими схемами. Комбіновані схеми кристалізації утфелю останнього продукту на сьогодні мають досить широке використання у вітчизняній і зарубіжній промисловості.

На рис 1. показана схема установки батареї вертикальних кристалізаторів фірми Yougu. За цією схемою утфель насосом подається в кристалізатор, де відбувається його охолодження і кристалізація сахарози. Кінцева температура охолодження 35...37°C, тривалість процесу 40 годин. Перед центрифугуванням утфель в мішалці нагрівається до 45...47°C. Мішалка для нагрівання утфелю з'єднана з попереднім кристалізатором перехідним коробом, що дозволяє утфелю рухатись за рахунок ефекту поєднаних посудин.

На більшості вітчизняних заводів із-за незначних виробничих площ встановлення додаткових горизонтальних кристалізаторів практично неможливе, а тривалість кристалізації охолодженням не забезпечує необхідний режим кристалізації. У вертикальних кристалізаторах забезпечується ефективний рух утфелю в режимі ідеального витіснення, при цьому можна змінювати режим охолодження.

Експлуатація батареї із чотирьох кристалізаторів вітчизняного виробництва дозволяє знизити чистоту меляси на 5,4%.

Для встановлення мінімально можливої кількості високовартісних насосів чотири кристалізатори були розділені на дві батареї по два кристалізатори в кожній. Проведений аналіз свідчить про те, що на сьогодні існує декілька варіантів ведення процесу кристалізації охолодженням утфелю останнього продукту. Всі вони в тій чи іншій мірі використовують розкачування утфелю водою чи цукровими розчинами. Це суттєво зменшує ефект кристалізації – різниця між чистотою міжкристалічного розчину на початку процесу кристалізації і в його кінці. Чистота продукту визначається відношенням відсоткового вмісту сахарози до відсоткового вмісту сухих речовин в продукті.

Проведений аналіз стану кристалізації охолодженням утфелю останнього ступеню кристалізації показав,

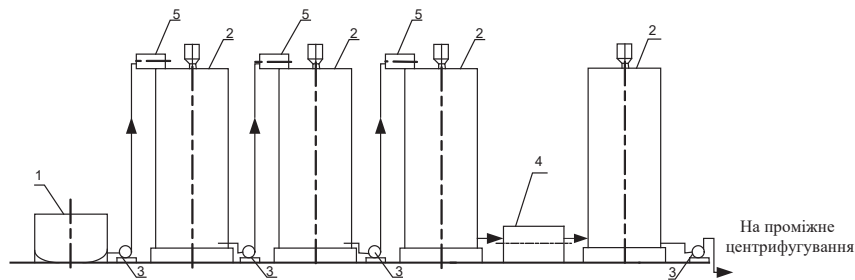


Рис. 1. Схема установки батареї кристалізаторів фірми Yougu: 1 – приймальна мішалка; 2 – кристалізатори; 3 – утфельні насоси; 4 – мішалка для підігріву; 5 – змішувачі.

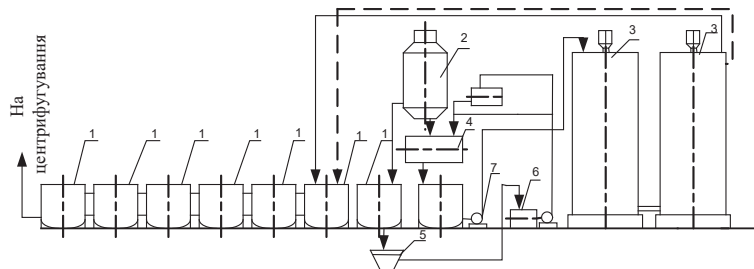


Рис.2. Принципова технологічна схема кристалізації сахарози із утфеля останньої кристалізації з двома вертикальними кристалізаторами: 1 – горизонтальні мішалки, 2 – вакуум-апарат, 3 – вертикальні кристалізатори, 4 – приймальна утфелемішалка, 5 – центрифуга, 6 – збірник меляси, 7 – насоси.

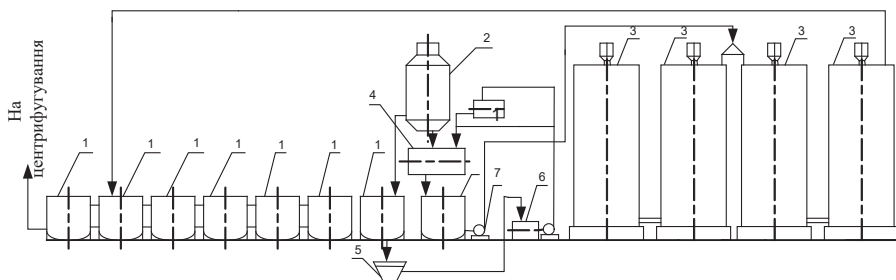


Рис.3. Принципова технологічна схема кристалізації сахарози із утфеля останньої кристалізації охолодженням з чотирма вертикальними кристалізаторами: 1 – горизонтальні мішалки, 2 – вакуум-апарат, 3 – вертикальні кристалізатори, 4 – приймальна утфелемішалка, 5 – центрифуга, 6 – збірник меляси, 7 – насоси.

що на сьогоднішній день в промисловості немає чітко визначених єдиних рекомендацій щодо раціонального ведення процесу кристалізації утфелю останнього продукту у перемішувачах-кристалізаторах.

Запропонований нами спосіб проміжного нагрівання утфелю дозволяє не лише зменшити коефіцієнт динамічної в'язкості і прискорити швидкість кристалізації, а й розчинити дрібні кристали, що утворилися в утфелі під час його охолодження. Експериментальні дослідження показали, що найбільш раціональним темпом охолодження утфелю до температури 50-55°C є швидкість охолодження 0,95-1,0 °C/год. Проміжне нагрівання слід проводити на 7-10°C, якомога швидше, близько 1°C/хв, після чого слід продовжувати охолодження з темпом 0,8-0,95°C/год. Якщо швидкість охолодження

буде вищою це може спричинити інтенсивне повторне зародкоутворення, тобто, висипання «муки». Швидкість охолодження змінюється в залежності від чистоти утфелю останнього продукту в межах 0,5°C/год на 1% чистоти, тобто цукрові утфелі вищої чистоти охолоджуються із максимальною швидкістю 1,0°C/год, низької чистоти – 0,8 °C/год. Швидкість проміжного нагрівання утфелю може коливатись в широких межах від 0,5°C/хв до 1,0°C/хв, а при використанні нагрівання утфелю в електричному полі до 3,0°C/хв.

Для забезпечення оптимальної швидкості кристалізації слід підтримувати коефіцієнт пересичення на рівні 1,35-1,4. При даній величині пересичення спостерігається найвища швидкість кристалізації при існуючих температурах кристалізації. При зниженні температури

до 50°C і нижче спостерігається значне зменшення швидкості кристалізації. Але за таких умов в міжкристальному розчині міститься ще досить значна кількість сахарози, що призводить до утворення вторинних кристалів, тому запропонований нами метод проміжного нагрівання утфелю є ефективним заходом по зниженню коефіцієнту динамічної в'язкості і коефіцієнту поверхневого натягу при якому швидкість кристалізації підвищується на 0,5 г/м²·год.

Слід виключити спосіб розкачки водою для зниження коефіцієнту динамічної в'язкості утфелю. Це дозволить значно зменшити вміст сахарози в мелясі. Для реалізації запропонованого нами способу політермічної кристалізації утфелю останнього ступеню кристалізації у вертикальних мішалках-кристалізаторах доцільно використовувати наступну машинно-апаратурну схему (рис.4).

Для цукрових заводів в яких використовується комбінована машинно-апаратурна схема кристалізації утфелю останнього продукту з вертикальними та горизонтальними перемішувачами-кристалізаторами пропонується використовувати нагрівач для проміжного нагрівання утфелю після вертикального перемішувача-кристалізатора. В якості нагрівачів утфелю доцільно використовувати електрофізичні нагрівачі. Такі нагрівачі знайшли широке застосування в цукровій промисловості для нагрівання утфелю перед центрифугуванням. Іншим способом проміжного нагрівання утфелю може бути застосування теплообмінника типу «труба в трубі», як це показано на рис.5.

В якості теплоносія в цьому випадку можуть бути використані конденсати останніх корпусів випарної станції цукрового заводу, що мають температуру з третього корпусу – 113°C, з четвертого – 99°C та з концентрата – 85°C.

Обговорення. Найбільш поширений у промисловості метод зниження в'язкості шляхом розкачки утфелю водою не є ефективним. Вода є значним мелясоутворювачем і спричиняє підвищення вмісту сахарози в мелясі. Процес кристалізації охолодженням утфелю останнього ступеню кристалізації потребує додаткових досліджень з метою визначення доцільності заміни розкачок утфелю проміжним нагріванням.

В умовах виробництва у мішалці-кристалізаторі утфель розкачується водою, його температура в місці надходження води складає 55°C. За таких умов поряд зі зменшенням, за рахунок розчинення, дрібних кристалів цукру, спостерігається незначне зменшення коефіцієнту динамічної в'язкості міжкристального розчину від 1,8 Па·с до 1,3 Па·с. При цьому коефіцієнт пересичення зменшується, розчин стає метастабільним, а після рівномірного розподілу розчинника між всією утфельною масою за рахунок його змішування з утфелем, процес нарощування кристалів дещо інтенсифікується. При цьому нові кристали не з'являються. За таких умов відбувається процес рекристалізації, тобто розчинення дрібних кристалів та перенесення молекул розчиненої сахарози на поверхню існуючих кристалів цукру. Разом з тим, при додаванні до утфелю води порушується ізогідричність процесу в бік збільшення масової частки води в міжкристальному розчині, що призводить до збільшення виходу меляси і вмісту сахарози в ній. Альтернативою розкачок утфелю останнього ступеню кристалізації в перемішувачах-кристалізаторах може бути їх зміна на теплові розкачки, тобто використання проміжного нагрівання утфелю.

Висновки. З метою досягнення максимального ефекту політермічної кристалізації сахарози утфелю останнього ступеню кристалізації в перемішувачах-кристалізаторах доцільно використовувати проміжне нагрівання утфелю замість розкачок його водою, що забезпечить ізогідричні умови процесу та максимальне знецукрення меляси.

Тривалість політермічної кристалізації сахарози визначається у відповідності до чистоти утфелю, що усуне умови вторинного кристалоутворення за рахунок узгодження темпу охолодження із швидкістю кристалізації сахарози.

Машинно-апаратурні схеми політермічної кристалізації утфелю останнього продукту оснащені пристроями для проміжного нагрівання утфелю (замість розкачок водою) відповідно до особливостей компоновки таких ділянок на конкретному підприємстві можуть сприяти зменшенню втрат сахарози в мелясі.

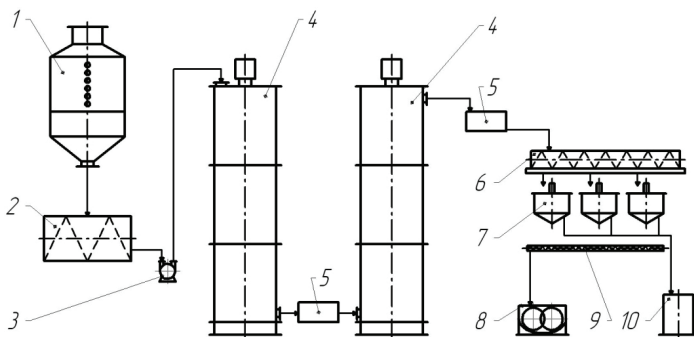


Рис.4. Удосконалена машинно-апаратурна схема політермічної кристалізації з проміжним нагріванням утфелю останнього ступеню кристалізації: 1 - вакуум-апарат; 2 – приймальний перемішувач; 3 – утфельний насос; 4 – вертикальні перемішувачі-кристалізатори; 5 – нагрівачі проміжного та кінцевого нагрівання утфелю; 6 – утфелерозподілювач; 7 – центрифуги; 8 – афінаційний перемішувач; 9 – шнек; 10 – збірник меляси

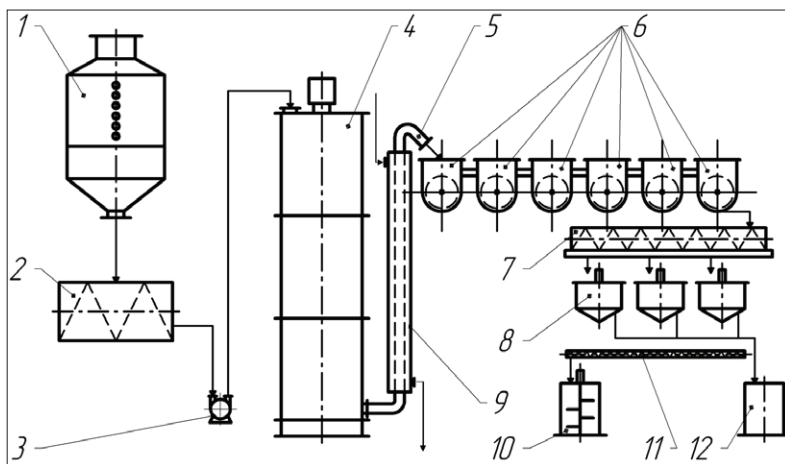


Рис.5. Машинно-апаратна схема кристалізації охолодженням утфелю останнього продукту з проміжним нагріванням утфелю: 1 - вакуум-апарат; 2 – приймальний перемішувач-кристалізатор; 3 – утфельний насос; 4 – вертикальний перемішувач-кристалізатор; 5 – утфельна труба; 6 – горизонтальні перемішувачі-кристалізатори; 7 - утфелерозподільувач перед центрифугами; 8 – центрифуги; 9 – теплообмінник; 10 – мішалка жовтого цукру; 11 – шнек жовтого цукру; 12 – збірник меляси

Бібліографічні посилання:

1. Doki, N., Kayamori, S., Yokota, M., Nemoto, T. and Kato, Y. (2022) Production of Sucrose Crystals of Uni-Modal Size Distribution by Seeded Batch Cooling Crystallization. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 10, 16-23. doi: 10.4236/msce.2022.1011002..
2. Gonzales, PEdM, de Souza Peloso, MA Jr., Olivo, JE, Andrade, CMG. (2020). Fed-Batch Sucrose Crystallization Model for the B Masecuite Vacuum Pan, Solution by Deterministic and Heuristic Methods. *Processes*. 8(9), 1145. <https://doi.org/10.3390/pr8091145>.
3. Höving, S., Oldach, B., Kockmann, N. (2022). Cooling Crystallization with Complex Temperature Profiles on a Quasi-Continuous and Modular Plant. *Processes*. 10, 1047. <https://doi.org/10.3390/pr10061047>.
4. Kim, S., Lee, SY, Ji, Chang, Ji W., Yang, D.R. (2023). Evaluation of the kinetics of unseeded batch cooling crystallization using population balance modeling: Sucrose and KNO₃ case studies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 118, 544-554. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.11.038>.
5. Myronchuk, V., Yeshchenko, O., Samilyk, M. (2013) Sucrose Cooling Crystallization Modelling. *Journal of Faculty of Food Engineering*. 2,109–114.
6. Rozsa, L. (2011). On-line monitoring and control of supersaturation and other masecuite parameters in vacuum pans: A control engineering approach. *International sugar jo*. 113(1356), 852-862.
7. Samad, N.A.F.A., Sin, G., Gernaey, K.V., Gani, R. (2013). A systematic framework for design of process monitoring and control (PAT) systems for crystallization processes. *Computers and Chemical Engineering*. 54, 8-23. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.03.003>
8. Samilyk, M.M. (2018). Udoskonalenyi sposib otrymannia meliasy nyzkoi chystoty z metoiu pidvyshchennia efektu krystalizatsii sakharozy. [An improved method of obtaining low-purity molasses in order to increase the effect of sucrose crystallization.] *Prodovolchi resursy*. 11, 148-154. <https://doi.org/10.31073/foodresources2018-11-17>. (in Ukrainian)
9. Schmalenberg, M., Kreis, S., Weick, L.K., Haas, C., Sallamon, F., Kockmann, N. (2021). Continuous Cooling Crystallization in a Coiled Flow Inverter Crystallizer Technology- Design, Characterization, and Hurdles. *Processes*. 9, 1537. <https://doi.org/10.3390/pr9091537>.
10. Schmalenberg, M., Mensing, L., Lindemann, S., Krell, T., Kockmann, N. (2022). Miniaturized draft tube baffle crystallizer for continuous cooling crystallization. *Chemical Engineering Research and Design*. 178, 232–250. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.12.024>.
11. Shamim, F., Hernández, R., Paulen, R., Engell, S. (2016). A hierarchical coordination approach to the optimal operation of a sugar crystallization process. *Computer Aided Chemical Engineering*. 38, 703-708. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63428-3.50122-3>.

Myronchuk V. G, Doctor of Technical Sciences, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

Samilyk M. M., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Nazarenko Y. V, PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Sabadash S. M., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Industry recommendations for sustainable management of the cooling sucrose crystallization process

Establishing the conditions for achieving the highest possible yield of high quality sugar with minimal loss of sucrose in molasses is an important task for sugar producers and scientists. It is shown that the use of pumping the masecuite of the last

stage of crystallization with water in the molds does not ensure the achievement of the maximum effect of crystallization due to violation of the isohydric conditions of the process. The purpose of this study is to develop an optimal method for carrying out the process of crystallization of sucrose in the massecuite of the last product. The article presents schemes of installations for industrial crystallization of utfei used in different countries of the world. Industry recommendations are given regarding the rational conduct of the process of crystallization of sucrose of the massecuite of the last degree of crystallization in the mixer-crystallizers by cooling. In order to ensure isohydric conditions of the process, instead of pumping the massecuite of the last degree of crystallization with water, it is proposed to carry out its intermediate heating by 7-10°C after cooling the massecuite to 50-55°C. When determining the mode of polythermal crystallization, the purity of the massecuite of the last degree of crystallization after the vacuum apparatus was taken into account. The proposed method of polythermal crystallization of sucrose is implemented by equipping the machine equipment of the station for additional crystallization of the massecuite of the last degree of crystallization with special heaters for intermediate heating of the massecuite in accordance with the layout of such schemes at a particular enterprise. Intermediate heating ensures a more complete depletion of molasses and increases the content and particle size distribution of sugar crystals in the massecuite. An example of the layout of a machine-hardware circuit for additional crystallization of sucrose, equipped with two vertical crystallizers using intermediate heating of the massecuite, is presented.

Key words: *sucrose, sugar, industrial production, crystallization by cooling, intermediate heating, massecuite, molasses, waste production*

ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИЦІЙНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ МІСЬКИХ ДРІБНОПАРТІЙНИХ ВАНТАЖІВ

Мороз Микола Миколайович

доктор технічних наук, професор

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна

ORCID: 0000-0001-6107-1230

mykolai.moroz@gmail.com

Шраменко Наталя Юріївна

доктор технічних наук, професор

Харківський національний технічний університет імені Петра Василенка, м. Харків, Україна

ORCID: 0000-0003-4101-433X

nshramenko@gmail.com

Мороз Олена Василівна

кандидат економічних наук, доцент

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна

ORCID: 0000-0003-4383-1544

alenamrz@gmail.com

Соларьов Олександр Олексійович

кандидат технічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-1485-0685

solarov.oleksandr@snau.edu.ua

Дрібнопартійні вантажні перевезення є важливою складовою роз-витку економіки багатьох сучасних підприємств, адже забезпечують швидке доставлення негабаритних вантажів до споживачів. Активно такі перевезення знайшли застосування в різних сферах, серед яких аграрна, сфера поштових послуг, доставки та інші. Підвищення ефективності дрібнопартійних вантажних перевезень є актуальним питанням, ключовим завданням якого є удосконалення логістичних маршрутів руху транспортних засобів. Розуміючи, що частка дрібнопартійних вантажів у загальному обсязі перевезень постійно зростає, а їх виконання не достатньо ефективне. У зв'язку з цим необхідно здійснювати пошук нових науково-практичних рішень, методів і моделей оптимізації процесу перевезення.

Розроблено методику формування раціональної технології транспортно-експедиційного обслуговування вантажовласників, що передбачає визначення раціонального напрямку застосування визначеної вантажності та класу автомобіля для роботи на розвізних маршрутах міст, чисельність яких перевищує 1 млн. мешканців. Зокрема розроблено практичні рекомендації з впровадження результатів дослідження. За критерій ефективності обрано мінімальні загальні витрати на міських розвезеннях дрібнопартійних вантажів за добу. Визначено, що розмір партії вантажу підпорядковується нормальному закону розподілу випадкової величини, а час навантаження та розвантаження 1 т вантажу – експоненційному закону. Проведено регресійний аналіз та отримано функцію залежності загальних витрат на розвезення дрібнопартійних вантажів за добу від кількості клієнтів при різному значенні середнього розміру партії вантажу та номінальної вантажності автомобілів, що працюють на розвізних маршрутах. Вона дозволяє визначити раціональні напрями використання певного класу вантажного автомобіля залежно від кількості клієнтів для відповідного значення середнього розміру партії вантажу. У статті розроблені практичні рекомендації, які дозволяють ресурсоефективно вико-ристовувати технології роботи автомобілів на маршруті перевезення із застосуванням конкретних марок автомобілів залежно від кількості клієнтів та обсягів вантажу.

Ключові слова: транспортно-експедиційне обслуговування, розвізні маршрути, міське сполучення, дрібнопартійні вантажі.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.7>

Вступ. На сучасному етапі розвитку в Україні все більше підприємств використовують логістичні концепції такі як: планування поставок «точно в термін», скорочення запасів тощо. Це призвело до зменшення розмірів поставок і збільшення частки дрібнопартійних вантажів у загальному обсягу перевезень. Ця тенденція

найбільше простежується при перевезеннях вантажів у міському сполученні.

Сучасна практика перевезень дрібнопартійних вантажів характери-зується невеликими обсягами перевезення на адресу одного вантажооде-р-жувача, а кількість пунктів призначення протягом доби може досягати від

декількох десятків до декількох сотень. Задача маршрутизації є однією з основних задач, які розв'язуються при плануванні перевезень дрібнопартійних вантажів у містах, від раціонального рішення якої багато в чому залежать ефективність використання рухомого складу та витрати на перевезення.

Для якісного транспортно-експедиційного обслуговування вантажо-власників у перевезенні вантажів, необхідно не тільки доставити зазначений обсяг вантажу, але й зробити це в певний час, що ускладнює формування розвізних маршрутів та вибір раціональної вантажності автомобілів, що виконують перевезення.

Зважаючи на те, що частка дрібнопартійних вантажів в загальному обсязі перевезень неухильно зростає, а рівень їх організації недостатньо ефективний, необхідно здійснювати пошук нових науково-практичних рішень, методів і моделей оптимізації процесу перевезення.

В результаті аналізу процесу організації дрібнопартійних перевезень в містах визначено ряд недоліків: формування нераціональних маршрутів; неврахування вимог клієнтів щодо часу завезення вантажу; застосування на розвізних маршрутах автомобілів нераціональної вантажності.

Для вирішення задач маршрутизації для розвізних, збірних та розвізно-збірних маршрутів науковці пропонують використовувати різноманітні методи (Luchko, 2010). Однак існуючі методи не передбачають наявності великої кількості клієнтів, що обслуговуються (порядку 100 і більше). При застосуванні ж класичних наближених методів для вказаних умов погрішність обчислень дуже велика, а час обчислення дуже значний, тобто вони не гарантують результативність за прийнятний час. Більшість методів формування розвізних маршрутів базуються на визначенні найкоротших маршрутів, однак не враховують пріоритетність клієнтів та будь-які стратегії їхнього обслуговування (Shramenko, 2009).

На основі аналізу наукових розробок вчених (Prokudin, 2006; Vasilev, 2009; Prokofeva, 2004; Filippov, 2012; Sheptura, 2004; Shramenko, 2009; Moroz, 2014; Shramenko, 2015; Levkovets. et. al, 2018), а також досвіду транспортно-експедиційними підприємствами можна зробити висновок, що оцінка транспортно-експедиційного обслуговування вантажовласників у міському сполученні час-тіше всього здійснюється тільки з позиції перевізників, а інтереси вантажовідправників та вантажоодержувачів щодо часу вивезення (завезення) вантажу відходять на другий план або залишаються повністю неврахованими, що свідчить про погіршення якості транспортно-експедиційного обслуговування.

Аналіз літературних джерел свідчить, що рівень організації дрібно-партійних перевезень недостатньо ефективний, більшість існуючих моделей організації транспортно-експедиційного процесу практично не враховують необхідність досягнення компромісу та рівноваги економічних інтересів усіх учасників транспортно-експедиційного процесу. Необхідно здійснювати пошук нових науково-практичних рішень, розробляти та удосконалювати існуючі підходи та моделі щодо планування та організації розвізних маршрутів для

скорочення використання ресурсів автотранспортного підприємства, підвищення якості транспортно-експедиційного обслуговування, що обумовить формування гнучкої тарифної політики транспортних підприємств, спрямованої на більш повне задоволення вимог вантажовласників.

Мета роботи – формування раціональної технології при організації перевезень дрібнопартійних вантажів у міському сполученні за рахунок вибору марки та вантажності автомобілів.

Матеріали і методи досліджень. Вартісні й деякі натуральні показники можуть характеризувати зміни, що відбуваються як в окремо взятих системах транспортування, виробництва й споживання, так і сумарно, тобто інтегральний ефект.

В якості критерію ефективності обрано мінімальні загальні витрати на розвезення дрібнопартійних вантажів за добу:

$$B_z = f(q_n, N, \bar{q}) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де q_n – номінальна вантажність автомобілів, які використовуються для роботи на розвізних маршрутах, т;

N – кількість споживачів, од.;

\bar{q} – середній розмір партії вантажу, т

Отже, необхідно визначити який вплив на загальні витрати на розвезення дрібнопартійних вантажів за добу мають номінальна вантажність автомобілів, що працюють на розвізних маршрутах, кількість клієнтів, а також середній розмір партії вантажу.

Для моделювання об'єкту дослідження обрано імітаційне моделювання, оскільки переважна кількість параметрів перевезення дрібнопартійних вантажів у міському сполученні є випадковими величинами. Цей метод моделювання дозволить більш точно врахувати характер внутрішніх процесів, розглянути стан системи в різних умовах.

На прикладі транспортно-експедиційного підприємства, що здійснює організацію перевезень дрібнопартійних вантажів в місті з чисельністю населення 1 млн., проведено статистичні дослідження. Визначено, що розмір партії вантажу підпорядковується нормальному закону розподілу випадкової величини з параметрами $a = 0,491$ т, $\sigma = 0,2$ т; час навантаження 1 т вантажу – експоненційному закону розподілу випадкової величини з параметром $b = 0,049$ год.; час розвантаження 1 т вантажу – експоненційному закону розподілу випадкової величини з параметром $b = 0,048$ год.

Виходячи з того, що найчастіше перевезення дрібнопартійних вантажів здійснюється бортовими тентованими автомобілями та фургонами вантажністю від 3 до 6 т, обрано 15 альтернативних марок автомобілів (Ofits. vyd., 2012). В результаті співставлення лінійних норм витрат палива та цін автомобілів з урахуванням їх найменших значень для імітаційного моделювання обрано класи автомобілів за вантажопідйомністю: малої (3 т) та середньої (4,2 т і 6 т).

Визначено рівні варіювання вхідних факторів: вантажність автомобіля – [3; 6] т; кількість клієнтів – [10; 100] од.; середній розмір партії вантажу – [0,241; 0,741] т.

Для проведення імітаційного експерименту розроблено план експерименту Плакетта-Бермана, кількість серій складає 90 од.

Результати. Імітаційні експерименти проведено за допомогою розробленого програмного забезпечення, відмінною особливістю якого є формування раціональних розвізних (збірних) маршрутів при перевезенні дрібнопартійних вантажів в міському сполученні для великої кількості замовників. В полі програми випадково генерується розміщення клієнтури та терміналу, а також обсяги перевезень і час доставки вантажу клієнтам.

Результатом є сформовані маршрути та значення загального пробігу на маршрутах за добу L_z . Опираючись на результати дослідження (Shramenko, 2010) формування маршрутів проводилося з урахуванням нежорстких часових вимог споживачів.

Для визначення раціональної області застосування на розвізних маршрутах кожної марки автомобіля в залежності від кількості клієнтів проведено імітаційне моделювання та отримано регресійні моделі для середнього розміру партії вантажу в 0,241 т, 0,491 т та 0,741 т (табл. 1). Розглянуто наступні види залежностей регресійних моделей: експоненціальна, поліноміальна та степенева.

Оскільки розмір партії вантажу підпорядковується нормальному за-кону розподілу випадкової величини, то згідно з правилом «трьох сигм» 99,7% значень випадкової величини потрапляють в інтервал $[a-3\sigma; a+3\sigma]$. В імітаційному моделюванні для генерації розміру партії вантажу значення її середньоквадратичного відхилення дорівнює $\sigma = 0,042$ т. З урахуванням цього встановлено діапазони варіювання розміру i -ї партії вантажу q_{fi} в залежності від значення середнього розміру партії вантажу \bar{q} : при $\bar{q} = 0,241$ т – $q_{fi} \in [0,05; 0,38]$ т; при $\bar{q} = 0,491$ т – $q_{fi} \in (0,38; 0,62)$ т; при $\bar{q} = 0,741$ т – $q_{fi} \in [0,62; 1,0]$ т.

Згідно з регресійними моделями (табл. 1) отримано графіки, що являють собою апроксимовані значення загальних витрат на розвезення дрібнопартійних вантажів за добу при різній кількості клієнтів та різному значенні середнього розміру партії вантажу для альтернативних марок автомобілів. Приклад наведено для середнього розміру партії вантажу 0,491 т (рис. 1).

Отже отриманні графіки (рис. 1) дозволяють визначити раціональні області застосування певної марки автомобіля в залежності від кількості клієнтів для роботи на розвізних маршрутах (табл. 2).

Таблиця 1

Регресійні моделі загальних витрат на розвезення дрібнопартійних вантажів за добу в залежності від кількості клієнтів для кожної марки автомобіля при різному значенні середнього розміру партії вантажу

Середній розмір партії вантажу, т	Клас автомобіля за вантажопідйомністю	Вид функції	Регресійна модель
0,241	малої (3 т)	Експоненціальна	$B_z = 502,06 \cdot e^{0,0229N}$
	середньої (4,2 т)	Експоненціальна	$B_z = 512,13 \cdot e^{0,021N}$
	середньої (6 т)	Експоненціальна	$B_z = 640,73 \cdot e^{0,019N}$
0,491	малої (3 т)	Степенева	$B_z = 33,788 \cdot N^{1,1348}$
	середньої (4,2 т)	Степенева	$B_z = 44,832 \cdot N^{1,0327}$
	середньої (6 т)	Експоненціальна	$B_z = 715,09 \cdot e^{0,0229N}$
0,741	малої (3 т)	Степенева	$B_z = 28,993 \cdot N^{1,2632}$
	середньої (4,2 т)	Степенева	$B_z = 35,997 \cdot N^{1,1736}$
	середньої (6 т)	Експоненціальна	$B_z = 756,58 \cdot e^{0,028N}$

Таким чином, для покращення ефективності роботи транспортно-експедиційного підприємства рекомендується:

- застосовувати сучасні методи формування розвізних маршрутів для великої кількості замовників, що дають найменшу похибку при оптимізації загального пробігу;
- здійснювати вибір раціональної вантажності автомобілів при роботі на розвізних маршрутах в залежності від середнього розміру партії вантажу та кількості вантажовласників, що обслуговуються (табл. 2);
- передбачати застосування диференційованих тарифів для можливості задоволення вимог вантажовласників щодо терміну доставки вантажів;

- враховувати інтереси вантажовласників при виборі стратегії формування розвізних маршрутів в умовах невизначеності та ризику з постійно змінюваним попитом, що сприятиме підвищенню рівня якості транспортного обслуговування.

Обговорення. Розроблено методику формування раціональної тех-нології транспортно-експедиційного обслуговування вантажовласників, що передбачає застосування раціональної вантажності та моделі автомобіля для роботи на розвізних маршрутах. В якості критерію ефективності роботи автомобілів на розвізних маршрутах запропоновано мінімальні загальні витрати на розвезення дрібнопартійних вантажів за добу.

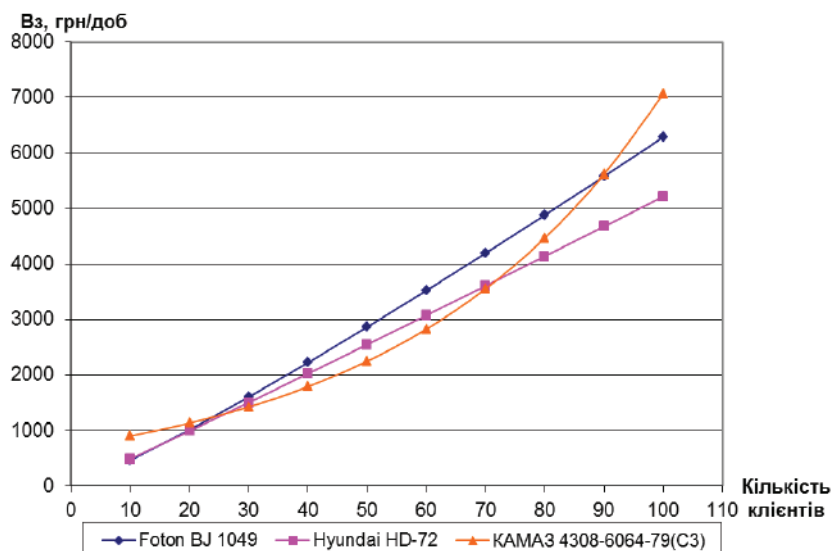


Рис. 1. Графіки залежності загальних витрат на розвезення вантажів за добу від кількості клієнтів при середньому розмірі партії вантажу 0,491 т

Подальші дослідження слід спрямувати на врахування умов невизначеності та ризику при прийнятті управлінських рішень під час організації дрібнопартійних перевезень вантажів на розвізних маршрутах в містах.

Висновки. На прикладі транспортно-експедиційного підприємства визначено закони розподілу випадкових величин процесу розвезення дрібнопартійних вантажів та їх параметри: розмір партії вантажу підпорядковується нормальному закону з математичним очікуванням 0,491 т та з середньоквадратичним відхиленням 0,2 т; час навантаження 1 вантажу – експоненційному закону з середнім значенням 0,049 год.; час розвантаження 1 т вантажу – експоненційному закону з середнім значенням 0,048 год.

Обґрунтовано вибір альтернативних класів автомобілів різної вантажопідйомності для імітаційного експерименту: малої (3 т), середньої (4,2 т) та середньої (6 т). Використовуючи результати імітаційного експерименту,

отримано регресійну модель, що найточніше описує залежність загальних витрати на розвезення дрібнопартійних вантажів за добу від номінальної вантажності автомобілів, кількості клієнтів та середнього розміру партії вантажу. Також отримано регресійні моделі, що дозволяють визначити раціональні області використання певної марки автомобіля в залежності від кількості клієнтів, що обслуговуються, при відповідному значенні середнього розміру партії вантажу.

Розроблено практичні рекомендації щодо формування ресурсозберігаючої технології роботи автомобілів на розвізних маршрутах, при цьому запропоновано раціональні області застосування відповідних марок автомобілів в залежності від кількості клієнтів та середнього розміру партії вантажу. Так, при середньому розмірі партії вантажу 0,491 т для обслуговування від 10 до 16 клієнтів доцільно використовувати автомобіль вантажністю 3 т, від 16 до 27 та більше 71 клієнтів – вантажністю 4,2 т, від 27 до 72 клієнтів – вантажністю 6 т.

Таблиця 2

Раціональні автомобілі залежно від кількості клієнтів та середнього розміру партії вантажу

Середній розмір партії вантажу, т	Кількість клієнтів	Рекомендований автомобіль	Вантажність, т
		Клас автомобіля за вантажопідйомністю	Вантажність, т
0,241	10	малої (3 т)	3
	11-100	середньої (4,2 т)	4,2
0,491	10-15	малої (3 т)	3
	16-26	середньої (4,2 т)	4,2
	27-71	середньої (6 т)	6
	72-100	середньої (4,2 т)	4,2
0,741	10,11	малої (3 т)	3
	12-23	середньої (4,2 т)	4,2
	24-68	середньої (6 т)	6
	69-100	середньої (4,2 т)	4,2

Бібліографічні посилання:

1. Luchko M.I. (2010). Udoshkonalennia transportnoho obsluhovuvannia zbirnykh ta rozviznykh marshrutiv u lohystychnomu lantsiuhu postachan [Improvement of transport service of assembly and delivery routes in the logistics supply chain]. *Visnyk SNU im. V. Dalia: naukovyi zhurnal* — 2010. — №4, ch. 2. — S. 120–126 (in Ukrainian).
2. Shramenko N. Yu. (2009). Metody marshrutyatsii pry dribnopartiionnykh pe-revezenniakh v transportnykh systemakh mist ta shliakhy yikh udoshkonalennia [Routing methods for small-part transportation in the transport systems of cities and ways to improve them]. *Komunalnoe khaziazstvo horodov : nauch.-tekhn. sb.* — 2009. — № 86. — S. 364–367 (in Ukrainian).
3. Prokudin H. S. (2006). Pryklad rozviazannia transportnoi zadachi za kriteri-yem chasu [An example of solving a transport problem based on the time criterion]. *Visnyk TAU ta NTU*. — K.: TAU, NTU. — 2006. — №11. — S. 367 – 373 (in Ukrainian).
4. Bosniak M.H. (2010). Vantazhni perevezennia: Navchalnyi posibnyk dlia vuziv [Freight transportation: Study guide for universities]. *Vydavnychi Dim Slovo*. 408 s. (in Ukrainian).
5. Nahornyi Ye. V., Naumov V. S., Ivanchenko A. V. (2012). Analiz suchasnykh pidkhodiv do pidvyshchennia efektyvnosti lohystychnykh system dostavky vantazhiv v mizhnarodnomu spoluchenni [Analysis of modern approaches to monitoring the effectiveness of logistics systems for the delivery of goods in international traffic]. *Transportnye systemy u tekhnolohyy perevozok*, (3), 68-72 (in Ukrainian).
6. Poddubnaya N., Kyrichok A. (2019). Optymizatsiia rozdashuvannia rozpodilnykh tsentriv v lohystychnii pidsystemi rozpodilu [Optimization of distribution centers in the logistics distribution subsystem]: *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia* № 3 (251), 135-143 (in Ukrainian).
7. Nikolaienko D.V. (2013). Analiz metodiv vyrishennia zavdan dostavky dribnopartiinykh vantazhiv [Analysis of the methods of solving the tasks of delivery of small consignments]. *Visnyk KhNU* №3. Tom 1. s. 195-197 (in Ukrainian).
8. Sheptura O.M. (2004). Pidvyshchennia efektyvnosti avtomobilnykh perevezhen partiionnykh vantazhiv pry zminnomu popyt na perevezennia [Observations on the efficiency of road transportation of bulk cargo with variable demand for transportation]: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : spets. 05.22.01 «Transportni systemy». — Kharkiv, 2004. — 18 s (in Ukrainian).
9. Normy vytrat palyva i mastylnykh materialiv na avtomobilnomu transporti [Norms of consumption of fuel and lubricants in road transport] — Ofits. vyd. — K. : HRIFRE : M-vo infrastruktury Ukrainy, 2012. — 85 s (in Ukrainian).
10. Shramenko N.Iu. (2009). Vybir optymalnoi stratehii obsluhovuvannia van-tazhovlasnykiv na rozviznykh marshrutakh [Choosing the optimal strategy for servicing truck owners on delivery routes]. *KhNADU*. — 2009. — № 44. — S. 78–82 (in Ukrainian).
11. Moroz M.M. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohichnoho protsesu transportnoho obsluhovuvannia m. Kremenchuk [Notifications of the effectiveness of the technological process of the transport service in the city of Kremenchuk]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnich-noho universytetu «KhPI»*. — Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. — № 43. — S. 103–109 (in Ukrainian).
12. Shramenko N.Iu., Moroz M.M. (2015). Formuvannia ratsionalnoi tekhnolohii transport-no-ekspedytsiinoho obsluhovuvannia vantazhovlasnykiv u miskomu spoluchenni [Formation of a rational technology of transport and forwarding services for cargo owners in urban traffic]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. — Kremenchuk: KrNU, 2015. — Vyp. 2/2015 (91). — S. 69–73 (in Ukrainian).
13. Levkovets P.R., Moroz M.M., Bubela A.V., Labuta A.V. (2008). Systemni aspekty vdoshkonalennia lohystychnoho servisu [Systemic aspects of logistics service improvement]. *Visnyk KDPU im. M. Ostrohradskoho*. — Kremenchuk: KrNU, 2008. — Vyp. 5/2018. — S. 52–55 (in Ukrainian).
14. Markevych A., Shramenko N., Moroz M. (2021). [Development of technology of urban forwarding service of small consignment customers]. *Norwegian Journal of Development of the International Science / Vypusk 58-1*. — Global Science Center LP, 2021. — p. 54-58. (in Norwegian).
15. Kirianov O.F., Moroz M.M., Boiko Yu.O. (2015). Informatsiini tekhnolohii na avtomobilnomu transporti [Information technologies in road transport]: navchalnyi posibnyk — Kharkiv: Drukarnia Madryd, 2015 (in Ukrainian).
16. Moroz, M., Markevich A., Moroz O., Vasylykovskiy O. [Results of Social-Transport Monitoring of Passenger Transportation Kremenchuk City]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 2019, Col.2(33) 76-90 (in Ukrainian).

Moroz M. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine

Shramenko, N. Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine

Moroz O. V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine

Solarov O. O., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University Sumy, Ukraine
Transport and expedition service for the transportation of city small party cargo

Small batch cargo transportation is an important component of the economic development of many modern enterprises, because they ensure fast delivery of oversized cargo to consumers. Such transportation is actively used in various fields, including agriculture, the field of postal services, delivery, and others. Improving the efficiency of small-lot freight transportation is an urgent issue, the key task of which is to improve the logistics routes of vehicles. Understanding that the share of small-part cargoes in the total volume of transportation is constantly growing, and their execution is not efficient enough. In this regard, it is necessary to search for new scientific and practical solutions, methods and models for optimizing the transportation process.

A methodology for the formation of a rational technology of transport and forwarding service for cargo owners has been developed, which involves determining the rational direction of application of a certain load and class of car for work on delivery routes of cities with a population of more than 1 million. In particular, practical recommendations on the implementation of research results have been developed. The minimum total costs for city deliveries of small-lot cargoes per day were chosen as the efficiency criterion. It was determined that the size of the cargo lot is subject to the normal distribution law of a random variable, and the loading and unloading time of 1 ton of cargo is subject to the exponential law. A regression analysis was carried out and the function of the dependence of the total costs for the delivery of small consignments per to-bu on the number of customers at different values of the average size of the consignment and the nominal load of cars operating on delivery routes was obtained. It allows you to determine the rational directions of use of a certain class of truck depending on the number of customers for the corresponding value of the average size of the cargo lot. The article develops practical recommendations that allow resource-efficient use of vehicle operation technologies on the transportation route with the use of specific vehicle brands depending on the number of customers and volume of cargo.

Key words: forwarding service, transportation routes, urban traffic, small consignment.

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАСІННЯ МАКУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СИРКІВ КИСЛОМОЛОЧНИХ

Петрова Олена Іванівна

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв
ORCID: 0000-0001-8612-3981
oipetrova@ukr.net

Болгова Наталія Вікторівна

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-0201-0769
natalia.bolhova@snau.edu.ua

Губа Світлана Олександрівна

старший викладач
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-0546-7940
snau-okunevska@ukr.net

Соколенко Вікторія Вікторівна

старший викладач
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0001-8149-4919
viktorii.sokolenko@snau.edu.ua

Доденко Андрій Володимирович

магістр
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-2165-4025
andri_dodenko@meta.ua

У роботі проаналізовано стан харчування населення України в умовах нестабільної економічної ситуації в державі на фоні військових дій. Залежність якості харчового раціону від доступних продуктів, та вплив харчування на здоров'я українців. Зроблено висновки щодо можливого покращення харчування шляхом введення в раціони продуктів щоденного споживання збагачених біологічно-цінними харчовими добавками рослинного походження. Головними завданнями роботи є: довести доцільність розробки нової рецептури за рахунок внесення інгредієнтів рослинного походження; проаналізувати класичну технологію виробництва білкових молочних продуктів та адаптувати її для реалізації нової рецептури; обґрунтувати харчову та біологічну цінність сиру кисломолочного та інгредієнту рослинного походження – насіння маку; визначити оптимальний відсоток внесення насіння маку в продукт; дослідити органолептичні властивості та хімічний склад готового продукту. **Основною метою** дослідження в роботі було обґрунтування рецептури і розробка технології виробів із сиру кисломолочного (вироби сиркові) з додаванням насіння маку. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень технології сирків кисломолочних з додаванням насіння маку. Розроблено адаптовану технологічну схему виробництва продукту за новою рецептурою. Розраховано хімічний склад нового продукту та ступінь задоволення добової потреби в основних мінеральних речовинах. **Висновки.** Проаналізовано класичну рецептуру сирків солодких із сиру кисломолочного. Доведено доцільність розробки рецептури сирків кисломолочних з використанням сировини рослинного походження, а саме насіння маку. Встановлено оптимальну кількість внесення насіння маку у основну масу продукту, що становить 2%. Розраховано харчову та енергетичну цінність готового продукту. З'ясовано, що введення до рецептури 2% насіння маку не погіршує органолептичних показників, готовий продукт має привабливий зовнішній вигляд, мастку однорідну консистенцію, приємний смак та аромат, що характерний даному виду кисломолочних сиркових виробів, що підтверджено результатами органолептичної оцінки. Встановлено, що вживання 200 г сирку з насінням маку забезпечує в середньому 31% фізіологічної добової потреби кальцію, 35% – фосфору, та 15,5% – магнію.

Ключові слова: харчування, харчова цінність, біологічна цінність, сирки кисломолочні, насіння маку, мінеральні речовини, інгредієнти рослинного походження, органолептика, рецептура.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.8>

Вступ. В сучасному світі люди перебувають в стані постійного нервового напруження, стреси та тривоги стали часткою життя кожного українця. На фоні нестабільної економічної ситуації відбувається стрімке зрощання базового набору продуктів.

Проаналізувавши дані Державної служби статистики України, можна відмітити незначне зниження споживання молочних продуктів населенням України, що становить в середньому 200 кг на рік, на фоні збільшення вживання хлібобулочних, круп'яних виробів та картоплі. Окрім того знижується вживання м'яса та риби. Це призводить до того, що раціон харчування пересічного українця стає біднішим, перш за все, на незамінні амінокислоти та жирні кислоти, також жиророзчинні вітаміни та такі макро- та мікроелементи як кальцій та залізо. Це призводить до проявів аліментарних захворювань та знижує опірність організму до інфекційних захворювань (Зубар, 2018).

Сьогодні ставить перед харчовою галуззю нові завдання, окрім життєво необхідного забезпечення людей базовим набором продуктів, також розробку продуктів з підвищеною харчовою та біологічною цінністю, які зможуть збагатити раціони харчування такими необхідними лімітуючими нутрієнтами.

Одним з варіантів вирішення такої задачі є збагачення продуктів щоденного споживання біологічно-цінними харчовими добавками.

Розробкою та науковим обґрунтуванням інноваційних молочних продуктів та, зокрема, білкових молочних продуктів з комбінованим складом сировини, збагачених функціональними харчовими добавками, займається ряд вчених: Гачак Ю.Р., Лялик А.Т., Рудакова Т.В., Тележенко Л.М., Пилипенко Л.М., Грек О.В., Севастьянова О.В. та інші.

Білкові молочні продукти, зокрема сири м'які свіжі, сири кисломолочні та вироби з них є продуктами щоденного харчування і суттєвим джерелом повноцінних харчових білків, макро-, мікроелементів, вітамінів. Так за даними (Дуденко та ін., 2009) в 100 грамах сиру кисломолочного напівжирного міститься 164 мг кальцію, тож при вживанні 200 г сиру забезпечимо організм 30% добової потреби в даному макроелементі. Проте, сир кисломолочний має не значний вміст вітамінів як жиророзчинних так і водорозчинних. Тож розробка науково обґрунтованої технології виробництва білкових молочних продуктів збагачених біологічно-цінними інгредієнтами рослинного походження є питанням актуальним і потребує подальших досліджень.

Отже, головними завданнями є: довести доцільність розробки нової рецептури за рахунок внесення інгредієнтів рослинного походження; проаналізувати класичну технологію виробництва білкових молочних продуктів та адаптувати її для реалізації нової рецептури; обґрунтувати харчову та біологічну цінність сиру кисломолочного та інгредієнту рослинного походження – насіння маку; визначити оптимальний відсоток внесення насіння маку в продукт; дослідити органолептичні властивості та хімічний склад готового продукту.

Матеріали і методи досліджень. Мета дослідження – обґрунтування рецептури і розробка технології

виробів із сиру кисломолочного (вироби сиркові) з додаванням насіння маку.

Об'єкт дослідження – технологія виробництва виробів із сиру кисломолочного з додаванням насіння маку.

Предметом дослідження є – вироби із сиру кисломолочного з додаванням насіння маку, сир кисломолочний (ДСТУ 4554:2006), вироби сиркові (ДСТУ 4503:2005), насіння маку (ДСТУ 7696:2015)

Методи дослідження – основні дослідженнями були проведені методами теоретичного узагальнення та аналізу, а також були використані розрахункові та органолептичні методи досліджень.

Результати дослідження. Згідно з ДСТУ 4503:2005, вироби сиркові виробляють з сиру кисломолочного з додаванням вершків, масла вершкового, наповнювачів і харчових добавок, до сиркових виробів відносять сирки, сиркові маси, десерти сиркові, торти з сиру кисломолочного. Харчова, біологічна та енергетична цінність готового продукту залежить від хімічного складу основної сировини та від внесеної харчосмакової добавки. Тому при виборі та встановленні оптимального відсотку внесення збагачуючого інгредієнту необхідно проаналізувати хімічний склад основних рецептурних компонентів. В таблиці 1 наведено порівняльний хімічний склад сиру кисломолочного в залежності від масової частки жиру в ньому (Дуденко та ін., 2009).

Як видно з таблиці 1 зі збільшенням масової частки жиру в сирі кисломолочному збільшується вміст вітаміну А, що можна пояснити його залежністю від вмісту жиру, вміст мінеральних речовин коливається в незначній мірі, тож при вживанні 100 г сиру кисломолочного напівжирного забезпечується 15% фізіологічної добової потреби кальцію, 20% добової потреби фосфору, але лише 6,5% магнію, тож ліміт магнію можна знизити додавши до рецептури насіння маку, та до того ж збагатити продукт іншими нутрієнтами, що містить насіння маку.

Насіння маку є джерелом поліненасичених жирних кислот, а наявність магнію та калію в насінні маку сприяє зменшенню стресу та зниженню артеріального тиску (Біленко, 2019). За використанням культурний мак поділяють на олійний та опійний. У харчових цілях використовують олійні культури маку. Калорійність маку складає 525 ккал у 100 грамах продукту. Хімічний склад насіння маку у 100 г представлено в таблиці 2.

Мак широко використовується в кондитерській, хлібопекарській промисловості, подекуди насіння використовують у виробництві молочних продуктів. Макова олія, добута з насіння маку холодним пресуванням використовується в харчовій, кондитерській та консервній промисловостях (Орлова, 2002).

Отже мак є цінною сировиною рослинного походження і в поєднанні з сиром кисломолочним може покращити харчову і біологічну цінність готового продукту.

В якості контрольного зразку було обрано класичну рецептуру сирків кисломолочних солодких з ваніліном масовою часткою жиру 8,0% (Степанова, 1999).

З метою визначення оптимальної кількості внесення маку в масу для сирків, нами було розроблено 3 варіанти рецептур з вмістом насіння маку від 2% до 6% (табл. 3).

Таблиця 1

Порівняльний хімічний склад сиру кисломолочного

Найменування нутрієнту	Сир кисломолочний нежирний	Сир кисломолочний напівжирний	Сир кисломолочний жирний
Білки, г/100г	18	16,7	14
Жири, г/100г	0,6	9,0	18,0
Вуглеводи, г/100г	1,8	2,0	2,8
Кальцій	120 мг	164 мг	150 мг
Калій	117 мг	112 мг	112 мг
Фосфор	189 мг	220 мг	216 мг
Магній	24 мг	23 мг	23 мг
Натрій	44 мг	41 мг	41 мг
Залізо	0,3 мг	0,4 мг	0,5 мг
Вітамін А	0,01 мг	0,05 мг	0,1 мг
Вітамін В1	0,04 мг	0,04 мг	0,05 мг
Вітамін В2	0,25 мг	0,27 мг	0,3 мг
Вітамін РР	0,45 мг	0,5 мг	0,5 мг
Вітамін С	0,5 мг	0,5 мг	0,5 мг

Таблиця 2

Хімічний склад насіння маку у 100 г

Найменування нутрієнту	Вміст в 100 г
Білки, г/100г	17,9
Жири, г/100г	41,9
Вуглеводи/харчові волокна, г/100г	14,5/6
Кальцій	1438 мг
Калій	719 мг
Фосфор	870 мг
Магній	347 мг
Натрій	26 мг
Залізо	9,76 мг
Марганець	6,7 мг
Мідь	1,63 мг
Селен	13,5 мкг
Цинк	7,9 мг
Вітамін А	762,0 мкг
Вітамін В ₁	0,85 мг
Вітамін В ₂	0,1 мг
Вітамін РР	0,9 мг
Вітамін В ₆	0,25 мг
Фолієва кислота	82,0 мкг
Вітамін С	1,0 мг
Вітамін Е	1,77 мг
Вітамін В ₄	8,8 мг

Таблиця 3

Рецептурний склад сирків кисломолочних солодких з додаванням насіння маку, на 100 кг

Сировина, кг	Варіанти рецептур			
	Контроль	№ 1	№ 2	№ 3
Сир кисломолочний з масовою часткою жиру 9 %, кг	89,92	87,92	85,92	83,92
Цукор-пісок, кг	10,08	10,08	10,075	10,075
Насіння маку, кг	-	2,0	4,0	6,0
Ванілін, кг	0,005	0,005	0,005	0,005
Всього	100	100	100	100

Визначення оптимальної дози внесення насіння маку проводили органолептично, за розробленою нами десятибальною шкалою, де – смак – 2,0 бали; аромат – 2,0 бали; – структура і консистенція – 3,0 бали; – колір – 1,0 бал; – зовнішній вигляд – 2,0 бали, та з врахуванням узагальненого хімічного складу компонентів.

Згідно з рисунком 1, визначено, що варіант рецептури 1 з вмістом насіння маку 2% має найвищі органолептичні показники, насіння маку розподілене рівномірно по всій масі продукту, структура однорідна, мастка, наявність насіння маку надає специфічних, приємних нот смаку, і відповідно оригінальний зовнішній вигляд, колір білий з численними вклученнями макових насінин розподілених рівномірно, аромат кисломолочний з вираженим ванільним запахом, запах маку майже не відчувається.

Недоліком зразків за рецептурами 2 і 3 було перенасичення основної маси сиру кисломолочного насінням маку, що призвело до погіршення структури продукту, небажаного, для такого типу продуктів, кольору, а також

занадто вираженого смаку, що не типовий для виробів із сиру кисломолочного.

Хімічний склад визначали розрахунковим способом з використанням табличного процесора MS Excel, представлено в таблиці 4.

Проаналізувавши дані (табл. 4), можемо зробити висновок, що внесення насіння маку в кількості 2% підвищує вміст мінеральних речовин, особливо кальцію, магнію та заліза. Також збільшився вміст вітаміну А та В₁. Проте, енергетична цінність продукту підвищилась не суттєво. Отже, введення насіння маку до рецептури підвищує функціональні властивості готового продукту, його біологічну цінність.

Сир кисломолочний та вироби із нього відносяться до продуктів щоденного вживання, а отже впливає на забезпечення організму основними харчовими речовинами. Проведено розрахунок задоволення фізіологічної добової потреби в основних речовинах при вживанні сиру з додаванням насіння маку на прикладі жінок віком 30 – 39 років I групи інтенсивності праці.

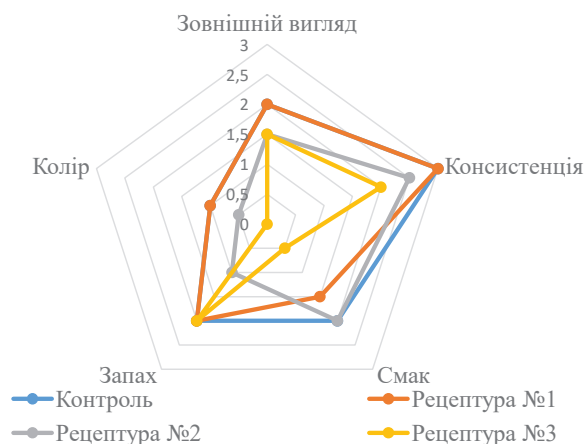


Рис. 1. Органолептична оцінка зразків розроблених рецептур у порівнянні з контрольним зразком

Таблиця 4

Порівняльна характеристика поживної цінності та хімічного складу сирків кисломолочних солодких з ваніліном з масовою часткою жиру 8,0%, зі зразком згідно Рецептури1, на 100 г продукту

Найменування показників	Контроль	Зразок за Рецептурою 1
Білки, г	15,0	15,0
Жири, г	8,1	8,8
Вуглеводи, г	10,8	11,0
Кальцій, мг	147,5	172,9
Калій, мг	100,7	112,9
Фосфор, мг	197,8	210,8
Магній, мг	20,7	27,2
Натрій, мг	36,9	36,6
Залізо, мг	0,36	0,55
Вітамін А, мг	0,04	0,06
Вітамін В ₁ , мг	0,04	0,05
Вітамін В ₂ , мг	0,24	0,24
Вітамін РР, мг	0,45	0,46
Вітамін С, мг	0,44	0,52
Енергетична цінність, ккал	176,1	183,2

Забезпечення фізіологічної добової потреби дорослого населення (жінки 30–39 років) I групи інтенсивності праці в основних харчових речовинах при вживанні сиру кисломолочного з насінням маку

Найменування показників	Фізіологічна добова потреба	Вміст в 100 г продукту	Забезпечення добової потреби, % (при умові вживання 200 г)
Білки, г	52	15,0	57,7
Жири, г	53	8,8	33,2
Вуглеводи, г	303	11,0	7,3
Кальцій, мг	1100	172,9	31,4
Фосфор, мг	1200	210,8	35,1
Магній, мг	350	27,2	15,5
Залізо, мг	17	0,55	6,5
Вітамін А, мг	1,0	0,06	12,0
Вітамін В ₁ , мг	1,3	0,05	7,7
Вітамін В ₂ , мг	1,6	0,24	30,0
Вітамін РР, мг	16	0,46	5,8
Вітамін С, мг	70	0,52	1,5
Енергетична цінність, ккал	1900	183,2	19,3

Отже продукт за розробленою рецептурою може забезпечити 31% фізіологічної добової потреби кальцію, 35% – фосфору, та 15,5% – магнію, 12% – вітаміну А, 30% – вітаміну В₂, при умові вживання його в кількості 200 г.

Технологія виробництва сирків із сиру кисломолочного має декілька варіацій (Грек, 2009). Відома технологія біфідовмісних (Климентьєва, 2020) та пробіотичних сиркових виробів (Капрельянц, 2003). Також розробкою та вдосконаленням рецептур та технологій займаються вчені в напрямку збагачення (Александров, 2019), (Гачак, 2016) та комбінування сиркових виробів з інгредієнтами рослинного походження (Рудакова, 2015), (Севастьянова, 2018).

Основним завданням при розробці технологічної схеми є адаптація робочих технологічних схем, з урахуванням обробки інгредієнтів нової рецептури, до умов виробництва. Реалізація технології за лежить від можливості її реального впровадження у виробництво. При розробці технологічної схеми було враховано особливість виробни-

чого процесу виробництва сирків із сиру кисломолочного. Адаповану технологічну схему виробництва сирків кисломолочних з насінням маку, представлено на рисунку 2.

Розроблена технологічна схема дозволить впровадити дану технологію на будь-якому молокопереробному підприємстві без зміни устаткування, на діючих технологічних лініях.

В планах подальших досліджень визначення впливу внесеного наповнювача на показники якості та безпеки в процесі зберігання.

Висновки. Проаналізовано класичну рецептури сирків солодких із сиру кисломолочного. Доведено доцільність розробки рецептури сирків кисломолочних з використанням сировини рослинного походження, а саме насіння маку. Встановлено оптимальну кількість внесення насіння маку у основну масу продукту, що становить 2%. Розраховано харчову та енергетичну цінність готового продукту. З'ясовано, що введення до рецептури 2% насіння маку не погіршує органолептичних показників, готовий



Рис. 2. Адапована технологічна схема виробництва сирків кисломолочних з насінням маку

продукт має привабливий зовнішній вигляд, мастку однорідну консистенцію, приємний смак та аромат, що характерний даному виду кисломолочних сиркових виробів, що підтверджено результатами органо-

лептичної оцінки. Встановлено, що вживання 200 г сирку з насінням маку забезпечує в середньому 31% фізіологічної добової потреби кальцію, 35% – фосфору, та 15,5% – магнію.

Бібліографічні посилання:

1. Aleksandrov O.V., Tsykhanovska I.V., Kaida N.S., Yevlash V.V. (2019) Rozrobka retseptury syrkovoho desertu "Slononia" z vykorystanniam kharchovoi dobavky "Magnetofud"[Development of reproduction of cheese dessert "Slononia" with the use of food additive "Magnetofood"]. Scientific Works of NUFT 2019. Volume 25, Issue 1. pp. 169-179. doi: 10.24263/2225-2924-2019-25-1-17 (in Ukrainian).
2. Bolhova N.V., Lykhach A.V. (2020) Analiz retseptury syru kyslomolochnoho, yak retsepturno komponentu syrkovoho desertu. [Analysis of the cottage cheese recipe as a component of the cheese dessert recipe] Book of abstracts. Food chemistry. Modern methods for production of food, food additives and packaging materials. October 7-9. Lviv, 2020. pp.62. (in Ukrainian).
3. DSTU 4503:2005. Vyroby syrkovy. Zahalni tekhnichni umovy. [Cottage cheese products. General specifications] Kyiv, 2006. 17 p. (in Ukrainian).
4. DSTU 7696:2015. Mak oliinyi. Zahalni tekhnichni vymohy. [Oil poppy. General specifications] Kyiv Institute of Bread Products, 2016. 15 p. (in Ukrainian).
5. DSTU4554:2006 Syr kyslomolochnyi. Tekhnichni umovy. [Cottage cheese Specifications] Kyiv, 2007. 10 p. (in Ukrainian).
6. Dubinina A.A., Letuta T.M., Yancheva M.O., Bondarenko V.F., Vinnikova V.O., Kruhlova O.S. Tovaroznavstvo produktiv funktsionalnoho pryznachennia: navch. Posibnyk.[Merchandising of functional product: a textbook] Kharkiv: KhDUKhT, 2015. 189 p. (in Ukrainian).
7. Dudenko N.V., Pavlotska L.F., Artemenko V.S., Holovko M.P., Kovalenko V.O., Yevlash V.V., Horban V.H. Osnovy fiziologii ta hihieny kharchuvannia: Pidruchnyk. [Fundamentals of physiology and nutrition hygiene: Textbook]. Sumy: VTD «Universytetska knyha», 2008. 558 p. (in Ukrainian).
8. Hachak Yu.R., Vavrysevych Ya.S. (2016) Zastosuvannia krioporoshku "Harbuz" v tekhnologii syrkovykh mas riznoi zhyrnosti. [The use of cryopowder «Pumpkin» in the technology of cheese masses with different fat content] Scientific Messenger LNUVMBT named after S.Z. Gzhytskyj, 2016, vol. 18, no 2 (68). series: food technologies. pp. 41-45. doi:10.15421/nvlvet6808 (in Ukrainian).
9. Henry, C. J. (2010) Functional foods. European Journal of Clinical Nutrition. 2010. № 64 P. 657-659.
10. Hrek O. V., Skorchenko T.A. (2009) Tekhnolohiia syru kyslomolochnoho ta syrkovykh vyrobiv: navchalnyi posibnyk. [Technology for the production of cottage cheese and curd products: a textbook] Kyiv: NUKhT, 2009. 235 p. (in Ukrainian).
11. Hrek O.V., Skorchenko T.A. (2012) Tekhnolohiia kombinovanykh produktiv na molochnii osnovi: Pidruch. [Technology of combined milk-based products: book] Kyiv : NUKhT, 2012. 362 p (in Ukrainian).
12. Kaprelants L. V., Iorhachova K. H. Funktsionalni produkty: [Functional products]. Odesa: Druk, 2003. 312 p. (in Ukrainian).
13. Klymentieva I. O., Tkachenko N. A., Yarosynska R. Ts., (2020) Modeliuvannia retseptury kombinovanoho bifidovmisnoho desertu zi zbalansovanykh khimichnym skladom. [Modeling of the recipe of a combined bifid-containing dessert with a balanced chemical composition] Collection of abstracts of reports of the 80th scientific conference, Odesa, May 7–8, 2020. Odesa: ONAFT, 2020. pp. 112–113 (in Ukrainian).
14. Lialyk, A. T., Pokotylo, O. S., Kukhtyn, M. D., & Beiko, L. A. (2021). Orhanoleptychni i sensoryni analiz syrkovoi pasty z lianoi oliiei. [ORGANOLEPTIC AND SENSORY ANALYSIS OF CURGE PASTE WITH LINEN OIL.] Technical sciences and technologies, 1(19), pp 287–295. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1\(19\)-287-295](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1(19)-287-295) (in Ukrainian).
15. Nazarenko I. V., Chumachova T. Yu (2013) Osoblyvosti vyrobnytstva syrkovykh deserviv. [Features of production of cottage cheese desserts] Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Region. 2013. № 76. pp. 99–104 (in Ukrainian).
16. Nazarenko Yu.V. (2011) Biotekhnolohiia kyslomolochnoho syru dytiachoho kharchuvannia z podovzhenym terminom zberihannia. [Biotechnology of cottage cheese for baby food with extended shelf life] Food Science and Technology. Odesa: ONAFT. № 2(15). 2011. pp. 41–45. (in Ukrainian).
17. Okunevska S.O. (2017) Obhruntuvannia parametriv fermentatsii molochnykh sumishei u tekhnologii deserviv syrkovykh dlia liudei, skhylnykh do arterialnoi hipertenzii. [Substantiation of parameters for fermentation of milk mixtures in technology of curd desserts for persons prone to arterial hypertension] East European Scientific Journal. Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe /Warszawa, Polska, 2017. № 6(22) С. 84–91. (in Ukrainian).
18. Orlova N. Ya., Ponomarov P. Kh. (2002) Tovaroznavstvo prodovolchyykh tovariv: Pidruchnyk [Merchandising of food products: Textbook]. Kyiv National University of Trade and Economics. K., 2002. 245 p. (in Ukrainian).
19. Pro zatverdzhennia Norm fiziologichnykh potreb naselennia Ukrainy v osnovnykh kharchovykh rehovynakh i enerhii (2017): [On the approval of the norms of physiological needs of the population of Ukraine in basic food substances and energy] Order of the Ministry of Health of Ukraine 03.09.2017 r. № 1073. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17> (in Ukrainian).
20. Rudakova T. V. (2015) Tekhnolohiia vyrobiv syrkovykh dlia dytiachoho kharchuvannia z vykorystanniam produktiv pererobky zerna. [Technology of cottage cheese products for baby food using grain processing products.] Cereal products and compound feed. 2015. № 2 (58). S. 9–14. (in Ukrainian).
21. Samilyk M.M., Tsyn Siuansuan, Bolhova N.V. (2022) Rozshyrennia asortymentu kyslomolochnykh napoiv z pidvyshchenoiu biolohichnoi tsinnistiu. [Expanding the assortment of fermented milk drinks with increased biological value] Scientific bulletin TDATU, 2022. Vyp. 12. Tom.1. pp. 188-199. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-1-18 (in Ukrainian).

22. Sevastianova O.V., Makovska T.V. (2018) Tekhnologii deserviv solodkoho ta solonoho napriamku z biokorektoramy. [Technologies of sweet and salty desserts with biocorrectors] Collection of abstracts of reports of the 78th scientific conference, Odesa, April 23–27, 2018. Odesa: ONAFT Zb. tez. dop. 78-yi nauk. konf. vykl. akad., Odesa, 23–27 kvit. 2018. pp. 105–107. (in Ukrainian).
23. Sevastianova O.V., Pylypenko L.M., Makovska T.V., Honcharov D.V. (2018) Nezhyrni syrkovy deserty z roslynnymy bioprotektoramy. [Nonfatty cheese-curd desserts with plant biocorrectors]. Taurida VI Vernadsky National University. Series: Technical sciences. Tom 29 ch.2 №2 2018 S. 272–278 (in Ukrainian).
24. Sposib vyhotovlennia syrkovoho desertu (2002). [The method of making cottage cheese dessert]; pat. UA 58976A, A 23C19/00. № 2002129603; zaiavl. 02.21.2002; opub. 15.08.2003; Biul №8. (in Ukrainian).
25. Stepanova L.Y. (1999) Spravochnyk tekhnoloha molochnoho proyzvodstva. Tekhnolohyia y retsepturi. V trekh tomakh. T I tselnomolochnye produkty. [Handbook of dairy production technologist. Technology and recipes. In three volumes. Volume I whole milk products] SPb: HYORD, 384 s. (in Russian)
26. Syrokhman I. V. Zahorodnia V. M. (2009) Tovaroznavstvo kharchovykh produktiv funktsionalnoho pryznachennia: navch. pos. [Commodity science of functional food products: study guide]. K.: Tsentр uchbovoi literatury, 2009. 544 s. (in Ukrainian).
27. Telezhenko L.M., Vikul S.I., Napadovska M.S. (2019) Rozroblennia retseptury syrkovoho desertu dlia profilaktyky nervovykh rozladiv. [A recipe development of cottage cheese desserts for the prevention of nervous disorders] Vcheni zapysky Taurida VI Vernadsky National University. Series: Technical sciences. Tom 30 part.2 №1 2019 pp. 78–86. (in Ukrainian).
28. Tiina Mattila-Sandholm, Maria Saarela (2003) Functional dairy products. Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC © 2003. 395 p.
29. Yeres I. O., Bolhova N. V. (2019) Obhruntuvannia vykorystannia chasnyku u vyrobnytstvi funktsionalnykh molochnykh produktiv. [Justification of the use of garlic in the production of functional dairy products.] Modern technologies in animal husbandry and fish farming: environment – production of products – environmental problems: a collection of materials of the 73rd All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation. K.: NUBiP Ukraine, 2019. pp. 314-316. (in Ukrainian).
30. Zubar N. M. Osnovy fiziolohii ta hihieny kharchuvannia: Pidruchnyk. [Fundamentals of physiology and nutrition hygiene: Textbook]. The publishing house «Kondor», 2018. 444 p. (in Ukrainian).

Bolgova N. V., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Huba S. O., Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Sokolenko V. V., Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Dodenco A. V., Master's Student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Scientific rationale for the use of poppy seeds in the production of curd products

The paper analyzes the state of nutrition of the population of Ukraine in the conditions of an unstable economic situation in the state against the backdrop of hostilities. The dependence of the quality of the diet on available products and the impact of nutrition on the health of Ukrainians. Conclusions are drawn about the possible improvement of nutrition by introducing daily consumption products enriched with biologically valuable food additives of plant origin into the diets. The main tasks of the work are: to prove the feasibility of developing a new recipe by adding ingredients of plant origin; analyze the classical technology for the production of protein dairy products and adapt it to the implementation of a new recipe; substantiate the nutritional and biological value of curd products and an ingredient of plant origin – poppy seeds; determine the optimal percentage of poppy seeds in the product; research the organoleptic properties and composition of the finished product. The main purpose of the research in the work was to substantiate the recipe and develop the technology of products from sour-milk cheese with the addition of poppy seeds. The results of theoretical and experimental research of a new technology of fermented milk curds with the addition of poppy seeds are presented. An adapted technological scheme for the production of a product according to a new recipe has been developed. The chemical composition of the new product and the degree of satisfaction of the daily requirement for basic minerals were calculated. Conclusions. The classic recipe for sweet curds from sour milk cheese is analyzed. The expediency of developing a recipe for fermented milk curds using raw materials of plant origin, namely poppy seeds, has been proved. The optimal amount of poppy seeds incorporation into the bulk of the product, which is 2%, has been established. Calculated nutritional and energy value of the finished product. It was found that the introduction of 2% poppy seeds into the recipe does not worsen organoleptic characteristics, the finished product has an attractive appearance, a homogeneous texture, a pleasant taste and aroma characteristic of this type of fermented milk cheese products, which is confirmed by the results of organoleptic evaluation. It has been established that the use of 200 g of curd with poppy seeds provides an average of 31% of the daily requirement of calcium, 35% of the daily requirement of phosphorus and 15,5% of the daily requirement of magnesium.

Key words: nutrition, nutritional value, biological value, fermented milk curds, poppy seeds, minerals, ingredients of plant origin, organoleptic, recipe.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ ХІМІЧНИХ МАШИН ТА АПАРАТІВ**Пуховський Євген Степанович**

доктор технічних наук, професор
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0001-7843-0922
puhovskije50@gmail.com

Фролов Володимир Костянтинович

кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-3697-286X
v.k.frolov@gmail.com

Приходько Василь Петрович

кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0003-1852-3777
privas0718@gmail.com

Бецко Юрій Михайлович

старший викладач
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-7283-2207
betsko.uri@gmail.com

Сучасне важке машинобудування характеризується значною часткою малосерійних і одиничних форм виробництва. Машини, вироблені для металургійної, енергетичної, гірничодобувної, хімічної промисловості, характеризуються значною металомісткістю і високою трудомісткістю їх виготовлення. Для виготовлення великогабаритних деталей використовується або універсальне обладнання та оснащення, або створюються технологічні комплекси, засновані на використанні унікального обладнання, великих пристосувань і наладок, а в деяких випадках – оригінальних інструментів. У зв'язку зі специфічними особливостями оброблення важких і великогабаритних деталей і низькою серійністю їх виробництва, при розробці технології неможливо механічно впроваджувати прогресивні методи і способи оброблення, а також організацію роботи, що широко застосовуються в великосерійному і масовому виробництві галузей, не пов'язаних з важким машинобудуванням. При обробленні таких деталей часто виникає необхідність в оригінальних технічних рішеннях (*Technologia tijaelogo mashinostroenia*, 1967).

Основними завданнями при обробленні важких і великогабаритних деталей є: досягнення необхідної геометрії точності, шорсткості поверхні і фізико-механічних властивостей поверхневого шару. Чистові та оздоблювальні операції, в процесі яких формуються фізико-механічні властивості поверхневого шару масивних деталей, а отже, і їх експлуатаційні якості, засновані на різанні матеріалів.

Оброблення великогабаритних деталей дуже трудомістке, пов'язане з великою витратою часу. Тому одним з основних питань, які доводиться вирішувати в важкому машинобудуванні, є підвищення продуктивності оброблення в результаті застосування передових технологічних рішень, подальше збільшення виробничого оснащення, його спеціалізації, механізації та часткової автоматизації (*Technologia tijaelogo mashinostroenia*, 1967).

Значним резервом підвищення продуктивності праці у важкому машинобудуванні є раціональна організація виробництва великогабаритних деталей, заснована на використанні групових технологічних процесів, типізації процесів, нормалізації обладнання та інструментів, централізації технологічної підготовки виробництва, впровадженні науково-технічних досягнень.

Хімічне і нафтове машино- та апаратобудування зазвичай має одиничний або малосерійний характер виробництва. Близько 50% хімічної і нафтової апаратури виготовляється за індивідуальними замовленнями та оригінальними моделями (*Berliner V.I., Valashov U.A.*, 1976). В таких умовах особливо утруднена технологічна підготовка виробництва, що характеризується застосуванням переважно універсального металорізального та ковально-пресового обладнання, невисокою оснащеністю спеціальним обладнанням та пристроями, створенням тимчасових спеціалізованих технологічних процесів (*Creditor M.A., Cherer G.A.*, 1967; *Koshelev O.S., Ivanov C.B., Tcheshnokov E.V.*, 2014). Аналіз конструкцій апаратів показує, що вони в основному складаються з однотипних

деталей та складальних одиниць (обичайок, днищ, люків, штуцерів, опор тощо). Це зумовлює можливість організації потокового виробництва. При потоковому методі виробництва апаратури створюються спеціалізовані ділянки та цехи, що працюють за принципом поточкових, механізованих ліній, які переналагоджуються для виготовлення, оброблення та складання стандартних і нормалізованих деталей, складальних одиниць і виробів (Vlasova G.B., Tchudevich D.A., Pivovarov N.A., 2022). Тому надзвичайно актуальними є проблеми оптимізації виготовлення та розрахунків параметрів розмірних характеристик основних деталей – обичайок та днищ хімічних апаратів.

Мета роботи. Дослідження розмірних характеристик заготовок корпусних деталей хімічних апаратів, їх впливу на технологію виготовлення та параметри якості деталей, а також оптимізація послідовності обробки в умовах малосерійного та одиничного виробництва.

Ключові слова: хімічний апарат, обичайка, днище, гнуття, штамповка, ковальсько-пресове обладнання, зварювання.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.9>

Виклад основного матеріалу. Основними деталями корпусів апаратів хімічних виробництв є обичайки та днища, які з'єднуються зварюванням.

Найбільш поширеними способами виготовлення обичайок з листового матеріалу є згинання, штампування та зварювання. Для виготовлення обичайок застосовують сталь, виплавлену в мартенівських і електричних печах, і сталь киснево-конверторного виробництва. Обичайки виготовляють з листової сталі звичайної якості або високолегованої корозійностійкої та жаростійкої сталі (Koshelev O.S., Ivanov S.B., Tchestnokov E.V., 2014).

Листовий прокат, що застосовується для виготовлення обичайок, у деяких випадках має спотворення поверхні та форми (хвилястість, вигини, випучини та інші дефекти). Зазначені дефекти листів завтовшки до 30 мм виправляють правкою на листопрямильних машинах-валцях (рис. 1). Лист 1 пропускають у холодному стані між двома рядами послідовно розташованих робочих валків 2. Для запобігання прогину робочі валки спираються на опорні валки 3. Правка здійснюється багаторазовим пластичним гнуттям, при якому волокна розтягуються і довжина їх стає однаковою. Лист рухається між валками зі швидкістю 0,1...0,2 м/с.

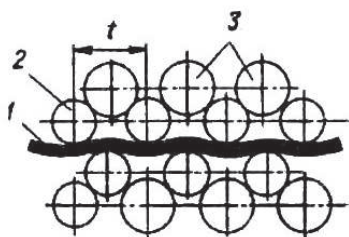


Рис. 1. Схема семивалкової правильної машини

Зусилля правки на верхньому або нижньому ряді валків

$$P = \frac{b\delta^2\sigma_{пл}(n-2)}{t},$$

де b і δ – відповідно ширина та товщина листа; $\sigma_{пл}$ – межа пластичності; n – число верхніх валків; t – відстань між осями валків.

Листову сталь, що застосовується для обичайок, очищають від поверхневих забруднень, окалини та іржі хімічним (травлення розведеними кислотами), терміч-

ним (газополум'яне оброблення) та механічним (піско- і шротоструминне очищення) способами.

Найбільш поширений спосіб шротоструминного очищення полягає в тому, що чавунний дріб діаметром 0,6...0,8 мм під дією відцентрової сили викидається з робочого колеса установки з великою швидкістю (до 60 м/с) на поверхню, що очищається. Швидкість руху листа 0,02...0,03 м/с. Внаслідок динамічного удару окалини руйнується і повністю видаляється з поверхні металу.

Вирізують і обробляють заготовки обичайок за лініями розмітки, які наносять при виконанні підготовчих операцій в одиничному та малосерійному виробництві. При більшому масштабі виробництва використовуються прогресивні методи розмітки (наприклад, фотопроекційний).

Довжина розгортки циліндричної обичайки внутрішнім діаметром $D_{в}$ зі сталі товщиною δ визначається за діаметром нейтральної поверхні $D_{нт}$:

$$L = \pi D_{нт} = \pi(D_{в} + \delta),$$

або з урахуванням низки технологічних факторів

$$L = \pi\left(D_{в} + \delta_{ф} + \frac{a}{2}\right) + b_1 + b_2 + 2z,$$

де $\delta_{ф}$ – фактична товщина листа; a – допустиме відхилення по овальності; b_1 – величина усадки зварного шва; b_2 – величина зазору під зварювання; z – припуск на оброблення кромки.

В табл. 1 наведено припуски на оброблення листового матеріалу в залежності від способу різання. Заготовки обичайок вирізають механічним, газовим та електрогазовим способами. Для різання металу механічним способом застосовують ножиці, дискові та стрічкові пили, диски тертя та механічні ножівки.

При різанні на ножицях (рис. 2) лист 2, що розрізається, знаходиться між нижнім нерухомим 3 і верхнім рухомим 1 ножами. Зусилля різання

$$P_{різ} = 0,5 \cdot \frac{\delta^2}{\text{tg}\varphi} \cdot \sigma_c,$$

де δ – товщина листа, що розрізається; φ – кут створу ножів; σ_c – межа міцності листа на зріз.

З умов запобігання виштовхуванню листа силою $P_{шт}$ кут створу ножів має бути меншим за 16° . Фактично

Припуски на обробку листового матеріалу залежно від способу різання

Спосіб різання металу	Товщина матеріалу, мм						
	3...7	8...12	13...16	17...20	21...25	26...28	29...31
Механічний (гільйотинні ножиці)	3	4	5	5	5	5	5
Газовий та електрогазовий	3	5	6	7	8	9	10

він не перевищує 6° . Для зменшення тертя між ножами і металом, що розрізається, робоча площина ножа повинна мати задній кут $\alpha = 1,5...3^\circ$. Кут між нижньою площиною ножа та площиною розрізу $\beta = 85^\circ$. Зазор між лезами ножів для забезпечення чистого різку має бути мінімальним: $a \leq 1/30 \delta$, але не більше 0,5 мм.

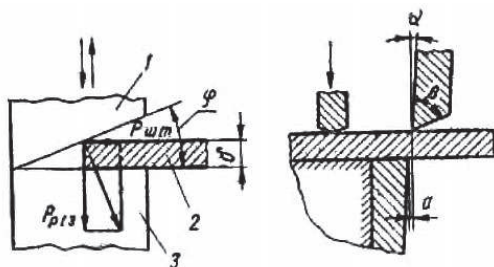


Рис. 2. Схема механічного різання листового прокату

Заготовки для обичайок вирізають на гільйотинних ножицях, які застосовуються для різання листового матеріалу завтовшки до 60 мм і завдовжки 1000...3200 мм. До недоліків механічного різання відносяться відсутність можливості різання по криволінійному контуру і оброблення кромки під зварювання, обмеження по товщині металу, що розрізається (до 60 мм), обмеження довжини різання (до 3200 мм) і висока вартість обладнання.

Широко застосовують також газове різання металу. Цим способом можна різати метал будь-якої товщини і довжини по прямому і криволінійному контурам з одночасним обробленням кромки під зварювання, отримувати досить високу точність і чистоту різку, що дає змогу виключити подальше механічне оброблення кромки. Глибина борозенок мікронерівностей становить 30...150 мкм.

З метою підвищення продуктивності і точності оброблення та збільшення коефіцієнту використання матеріалу широко застосовується газорізальне обладнання з ЧПК. Зазвичай таке обладнання використовується в комплексі з програмними засобами, що здійснюють розрахунок розмірів заготовки, вибір раціонального варіанта розкрою листа, а також призначення оптимальних режимів оброблення (Vlasova G.B., Tchudevich D.A., Pivovarov N.A., 2022).

В даний час широко впроваджується плазмово-дуговий спосіб різання металів як найбільш універсальний та продуктивний. Газоелектричне різання металів вольфрамовим електродом діаметром 3...6 мм у середовищі захисних

газів (азоту, аргону та суміші аргону з воднем) засноване на розплавленні та видуванні металу із зони різку.

Оброблення кромки листових заготовок обичайок виконують з метою видалення шару неякісного (наклепаного або газонасиченого) металу та для отримання прямолінійності кромки із заданою конфігурацією оброблення під стикове зварювання. Оброблення здійснюють механічним способом або газовою різкою.

Кромки заготовок довжиною до 12 м обробляють на кромкостругальних верстатах. Заготовку закріплюють на столі верстата гвинтовими, гідравлічними або пневматичними затискачами, кромку обробляють у процесі зворотно-поступального руху каретки із закріпленим у ній різцем. При зміні руху каретки різець повертають. При чорновому обробленні швидкість різання знаходиться в межах 0,13...0,2 м/с при глибині різання 4...6 мм і подачі 0,5...1 мм/подв. хід; при чистовому обробленні кромки швидкість різання становить 0,16...0,24 м/с при глибині різання 2...3 мм та подачі 0,2...0,3 мм/подв. хід.

Для газового стругання застосовують спеціальні мундштуки, які дають змогу не лише обробляти кромки, а й видаляти дефекти зварних швів. Повітряно-дугове стругання відрізняється від газового вищою продуктивністю, викликає меншу деформацію виробу і полягає в тому, що метал розплавляється дугою вугільного електрода діаметром 4...10 мм і видувається струменем стисненого повітря.

Іноді кромка листа повинна мати потовщення задля підвищення конструктивної міцності деталі, компенсації ослаблення в зоні зварювання, підвищення жорсткості та інших цілей. Потовщення кромки отримують в результаті торцевої прокатки.

Основним способом виготовлення обичайок корпусів хімічних апаратів є згинання листового прокату, що виконується переважно на валкових листозгинальних машинах. Цей спосіб має значні переваги в порівнянні з виконанням подібних операцій на пресах у штампах. Гнуття здійснюється за допомогою пластичного згину при розміщенні заготовки між валками, що обертаються під дією сил тертя, які виникають між заготовкою і валками. Пластичне деформування металу відбувається у локальній зоні, яка безперервно переміщується вздовж заготовки (Koshelev O.S., Ivanov S.B., 2014).

Гнуття здійснюється в холодному та гарячому стані. По можливості необхідно віддавати перевагу холодному згинанню. На рис. 3 показані області раціонального застосування холодного та гарячого згинання. При внутрішньому діаметрі обичайки $D_b < 40 \delta$ згинання слід проводити в гарячому стані.

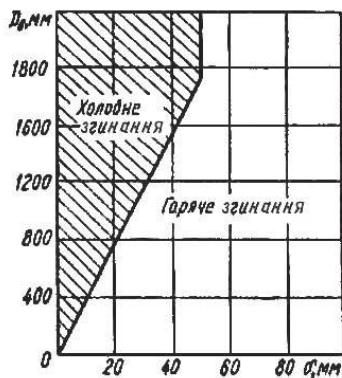


Рис. 3. Области застосування холодного і гарячого згинання листової сталі

Гнуття обичайок проводиться на листозгинальних машинах, які діляться в основному на дві групи: три- та чотиривалкові. Найбільш прогресивним для циліндричних обичайок є згинання на чотиривалкових машинах (рис. 4), а також на тривалкових машинах з регульованими бічними валками (Moshnin E.N., 1967).

При згинанні на чотиривалковій машині заготовка заводиться у валки до упору в протилежний бічний валок (рис. 4, а) і затискається між середнім і нижнім валками в результаті переміщення вгору нижнього валка. Потім проводиться згинання заготовки на вузькій ділянці шляхом переміщення бічного валка (рис. 4, б). При включенні обертання валків кінець заготовки до краю згинається на кінцевий радіус (рис. 4, в). Після цього валки встановлюються за симетричною схемою та згинається середня ділянка заготовки на проміжний радіус (рис. 4, г). Підгинання другого кінця заготовки здійснюється тим самим способом, що і підгинання першого. Потім за один-два пропуски між валками заготовка на середній ділянці згинається на остаточний радіус (рис. 4, д, е).

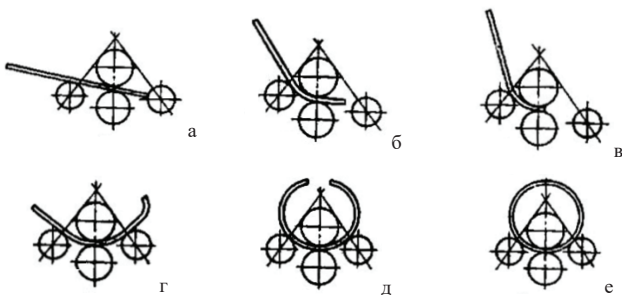


Рис. 4. Згинання обичайки на чотиривалковій машині

Гнуття обичайок на машинах з асиметричним розташуванням валків показана на рис. 5. Кінець листа затискається між валками 1 та 2 і підняттям валка 3 згинається (рис. 5, а) по заданому радіусу, контрольованому шаблонами. Потім лист виймають з машини, перевертають і вставляють між валками з іншого боку (рис. 5, б), після чого здійснюється остаточне згинання за один прохід (рис. 5, в).



Рис. 5. Гнуття обичайки на машині з асиметричним розташуванням валків

У машинах симетричного типу зазвичай проводиться згинання заготовки з попередньо підігнутими на іншому обладнанні кромками. Підгинання кромки здійснюється на підгинальній парно-роликівій машині або підгинальному пресі. Іноді підгинання кромки здійснюється і на машині з симетричним розташуванням валків за допомогою допоміжної плити (рис. 6, а) або спеціального клину (рис. 6, б). Лист 1 заводять між приводними 3 і натискним 2 валками (рис. 7). Потім натискний валок підводиться впритул до листа, притискає його до нижніх валків і прогинає. При обертанні приводних валків лист отримує поступальний рух. Одночасно з реверсивним прокочуванням листа здійснюється подача натискного валка і внаслідок цього – згинання листа до заданого радіусу.

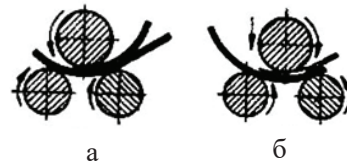


Рис. 6. Способи підгинання кромки на тривалковій машині із симетричним розташуванням валків



Рис. 7. Гнуття обичайки на тривалковій машині із симетричним розташуванням валків

При згинанні на машинах з верхнім валком, що переміщується в горизонтальному напрямку (рис. 8), лист закладається між валками, верхній валок зсувається в ліве положення (рис. 8, а), притискається до отримання необхідного зусилля (рис. 8, б), лист просувається вперед (рис. 8, в), в результаті чого виконується підгинання однієї кромки. Так само підгинається друга кромка (рис. 8, г, д, е), після чого валок встановлюють у положення, що забезпечує необхідний радіус вигину, та виконують кругове згинання листа (рис. 8, ж).

Для згинання заготовок обичайок у нагрітому стані і при виготовленні обичайок великих діаметрів застосовують вертикальні листозгинальні машини. Гнуття листа (рис. 9) виконується між циліндричним приводним валком 1 і бічними опорами 2, відстань між якими може змінюватися (рис. 9, а).

Гідравлічний затискний ролик 3 в процесі згинання постійно підтиснутий до листа 4. Лист укладається на опори, які при русі у напрямку до валка згинають

ділянку листа. Потім опори відводяться і включається обертання валка, при цьому лист переміщується між валком і роликом на деяку відстань (рис. 9, б), після чого опори знову переміщуються у напрямку до валка (рис. 9, в) і згинають наступну ділянку. Ці рухи автоматизовані та повторюються до повного вигину листа.

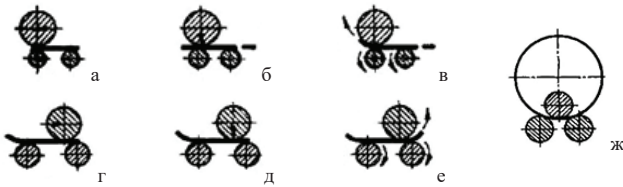


Рис. 8. Гнуття обичайки на машині з верхнім валком, що переміщується в горизонтальному напрямку

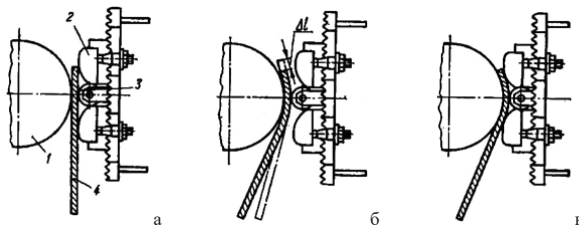


Рис. 9. Гнуття обичайки на вертикальній листозгинальній машині

Якщо потужність обладнання недостатня для вигину листа в холодному стані, згинання виконують з попереднім нагріванням. Температура та режим нагрівання обичайки залежать від марки сталі та товщини стінки листа. Температура вибирається нижче тієї, при якій утворюється окалина. Вуглецеві сталі нагрівають до температури 930...950°C, сталі типу 12ХМ, 12МХ – до 980...1050°C.

Для отримання необхідних механічних властивостей металу пластичне деформування його закінчується при температурі не нижче 600°C для вуглецевих і 700...750°C для легованих сталей.

Гнуття конічних обичайок відрізняється деякими особливостями, зумовленими їхньою формою. При згинанні конічних обичайок необхідно створювати неоднаковий по ширині заготовки прогин її між валками (у кромки з меншим радіусом створюється більший прогин, ніж у кромки з більшим радіусом). Вершина конуса обичайки, що згинається, завжди повинна лежати у вертикальній площині, яка проходить через поздовжню вісь середнього валка.

В якості заготовки для конічних обичайок використовують листову сталь. Розгортки конічних обичайок мають вигляд кільцевих секторів (рис. 10). Розміри конічної обичайки пов'язані між собою залежностями:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_1 - R_2}{l_0}; \quad l = \frac{l_0}{\cos \alpha}; \quad S_1 = \frac{R_1}{\sin \alpha}; \quad s_2 = s_1 - l.$$

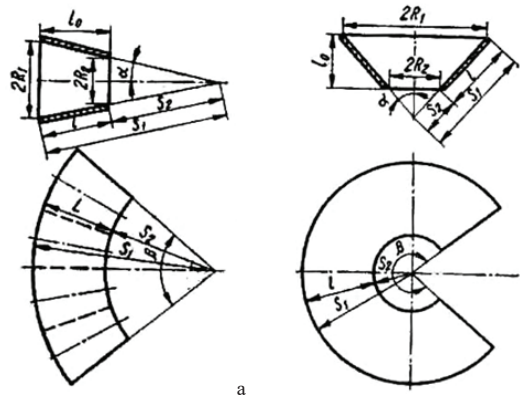


Рис. 10. Форма заготовок для конічних обичайок

Кут сектору заготовки $\beta = 360 \sin \alpha$ або $\beta = 360 \frac{R_1}{S_1}$.

Для конічної обичайки з кутом конуса до 60° потрібна заготовка з центральним кутом, меншим 180° (рис. 10, а), а при більшому куті конуса – з кутом, що перевищує 180° (рис. 10, б).

Корпуси апаратів високого тиску, що мають великі габаритні розміри (діаметр 3000 мм і вище), виготовляються цілноккованими, ковано-звареними, штампо-звареними, крученими та багатошаровими.

На рис. 11 представлені деякі способи виготовлення корпусів товстостінних апаратів високого тиску (Pikhtovnikov R.V., Zavalov A.D., 1964). При виготовленні кованих корпусів (рис. 11, а) з великих злитків застосовується унікальне обладнання. Цей спосіб характеризується великим обсягом механічного оброблення, низьким коефіцієнтом використання матеріалу, обмеженими можливостями збільшення розмірів та розширення обсягу випуску корпусів.

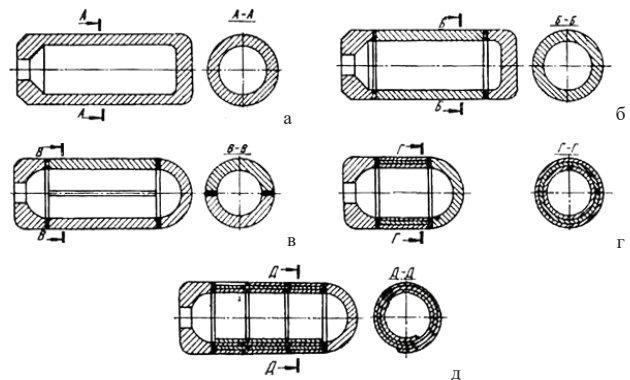


Рис. 11. Способи виготовлення корпусів товстостінних апаратів високого тиску

При виготовленні ковано-зварних корпусів (рис. 11, б) знижується обсяг трудомістких кувальних робіт, збільшується продуктивність металорізального обладнання, відпадає необхідність у будівництві нових цехів.

Виготовлення штампо-зварних корпусів (рис. 11, в) характеризується ще більш високою економічністю виробництва, оскільки малопродуктивне кування замінено штампуванням. Крім того, при цьому способі підвищується точність виготовлення заготовок обичайок

і днищ і відповідно зменшується обсяг механічного оброблення.

Для корпусів апаратів високого тиску успішно застосовується спосіб виготовлення з окремих концентричних шарів (рис. 11, г) або з рулонованих заготовок (рис. 11, д). При використанні цих способів немає необхідності у застосуванні злитків металу, не потрібне обладнання для їх кування, штампування та механічного оброблення. Технологія виготовлення корпусів цими способами проста, тому не потрібні робітники високої кваліфікації.

Багат шарові апарати мають велику надійність в експлуатації, оскільки для їх виготовлення можна використовувати тонколистову сталь з більш високими характеристиками якості, ніж у товстолистої сталі. При використанні цих способів на 20% знижуються витрати матеріалу та загальна вартість апаратів (Technologia izgotovlenia, 2017).

Другим основним елементом будь якого хімічного апарату є днище. Підвищення робочих тисків і температур зумовили різноманітність форми днищ. Широко застосовуються еліптичні, плоскі відбортовані, сферичні, напівкульові та конічні днища (Creditor M.A., Sherer G.A., 1967; Polikarov E.U., 2010). Деякі форми днищ показані на рис. 12. Найбільш поширеними є еліптичні днища (рис. 12, а), геометричні розміри яких представлені в табл. 2. Днища виконуються діаметром від 299 до 4200 мм з товщиною стінки від 4 до 60 мм і мають циліндричну ділянку (борт) заввишки 25...60 мм. Їх виготовляють з листової сталі різних марок (15, 15K, 20, 20K, 25, Ст2, Ст3, сталь 30, мСт2 і мСт3), з нержавіючої сталі (наприклад, Х18Н10Т), титану та його сплавів, міді, алюмінію та його сплавів.

Днища, які піддаються дії агресивних середовищ, виготовляють із кислототривких і вуглецевих сталей, що плакуються з одного боку кислототривкою сталлю.

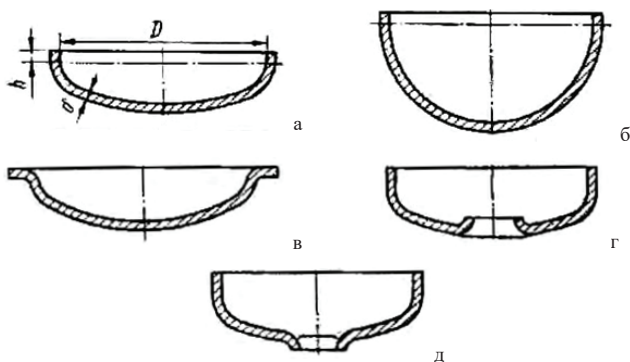


Рис. 12. Основні форми днищ: а – еліптичне; б – сферичне; в – з фланцем; г – з отвором, відбортованим всередину; д – з отвором, відбортованим назовні

Для виготовлення днищ вибираються круглі заготовки, вирізані з листової сталі. Розміри вихідної заготовки зазвичай визначають приблизно з невеликим запасом, а потім уточнюють їх при виготовленні перших заготовок. Прийнято вважати (Chemical

and Pharmaceutical equipments, 2022), що при штампуванні днищ поверхня заготовки залишається постійною, тобто розтягування заготовки на центральній ділянці компенсується зменшенням площі заготовки на периферійній ділянці. Діаметр плоскої заготовки визначають, виходячи з умови сталості площі поверхні заготовки:

$$D_s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\Sigma F},$$

де ΣF – сума площ поверхонь простих елементів, з яких складається деталь.

Формули, за якими можна визначити діаметр плоскої заготовки для найбільш поширених днищ, вказані в табл. 3. У наведених рекомендаціях щодо підрахунку розмірів заготовки розміри днища приймають по середньому колу.

В умовах великосерійного виробництва найбільш поширеним та економічним способом виробництва є штампування днищ на пресах. У малосерійному виробництві днищ зазвичай застосовують такі способи виготовлення, при яких використовуються менш дороге обладнання та оснащення (наприклад, видавлювання, гідроштампування, електромагнітне та вакуумне формування) (The manufacture of apparatus and chemicals, 2021).

На рис. 13 показаний штамп для штампування днищ на провал. Пустотілий пуансон 2 штампа (рис. 13, а), виготовлений із сталевого лиття, закріплений на стійці 1 матриці 3, що має форму протяжного кільця. Матриця встановлена на стійках преса 5, в яких також кріпляться зйомники 4. Форма торцевої поверхні пуансона відповідає формі днища. На торці пуансона є штир, що входить в центральний отвір днища і захищає днище від бічного зміщення під час штампування. Штамп має комплект матричних кілець, кожне з яких призначене для штампування днища з певною товщиною стінки.

Штампування днища проводиться наступним чином. Нагріта заготовка транспортується від печі, встановлюється на верхній площині матриці та центрується по упорах. При протягуванні заготовки пуансоном через матрицю вона набуває форми пуансона. Після штампування і виходу заготовки з матриці штирі зйомника 4 висуваються і при зворотному ході днище пуансона знімається. На штирях зйомника 4 виконані скоси, тому вони легко засуваються всередину на початку наступного ходу. Для видалення днища передня стійка штампу відсувається і днище разом з підкладною плитою 6 висувається лебідкою. Зручніше знімати відштамповане днище в штампі зі складаним пуансоном, що має клиноподібні вкладиші (рис. 13, б). При штампуванні складаний вкладиш, зовнішня поверхня якого відповідає формі днища, притискається верхніми торцями до борту конічної частини пуансона. При зворотному ході зовнішній діаметр пуансона зменшується і днище вільно знімається. Кут конічної частини пуансона 10...12°, а зазор між вкладишами – трохи більше 5 мм.




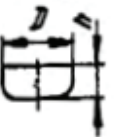
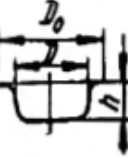

Геометричні розміри еліптичних днищ, мм

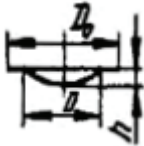

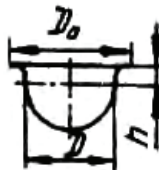
Внутрішні розміри днища		Товщина δ^*	Внутрішні розміри днища		Товщина δ^*
Діаметр D	Висота h		Діаметр D	Висота h	
400	100	4...16	1600	400	8...42, 46, 50, 54, 60
450	112	4...18	1700	425	10...42, 46, 50, 54, 60
500	125	4...20	1800	450	10...42, 46, 50, 54, 60
550	137	4...20	2000	500	10...42, 46, 50, 54, 60
600	150	4...24	2200	550	12...42
650	162	4...26	2400	600	12...42
700	175	4...26	2600	650	12...34
800	200	6...28	2800	700	14...30
900	225	6...30	3000	750	16...30
1000	250	6...30	3200	800	20...28
1100	275	6...30	3400	850	20...28
1200	300	6...30	3600	900	22...28
1300	325	6...32	3800	950	22...28
1400	350	6...42, 46, 50, 54, 60	4000	1000	22...28
1500	375	8...42, 46, 50, 54, 60			

*В інтервали значень величини δ входять не всі цифри, а через одну (наприклад, в інтервал 4...16 даної таблиці входять цифри 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16).

Таблиця 3

Формули для визначення діаметрів заготовок днищ

Днище	Ескіз	Діаметр заготовки
Сферичне		$D_s = 1,41D\sqrt{1 + 2\frac{h}{D}}$
Стандартне еліптичне ($h = D/4$)		$D_s = D\sqrt{1,38 + 4\frac{h}{D}}$
Мілке еліптичне ($h = D/16$)		$D_s = D\sqrt{1,21 + 4\frac{h}{D}}$
Плоске відбортоване з малими закругленнями		$D_s = D\sqrt{1 + 4\frac{h}{D}}$
Плоске відбортоване з фланцем та малими закругленнями		$D_s = D\sqrt{\frac{D_0^2}{D_2} + 4\frac{h}{D}}$
Плоске відбортоване з великими закругленнями		$D_s = D\sqrt{1 - 1,72\frac{r}{D} - 0,56\left(\frac{r}{D}\right)^2 + 4\frac{h}{D}}$

Тарілчасте		$D_s = D \sqrt{\left(\frac{D_0}{D}\right)^2 + 4\left(\frac{h}{D}\right)^2}$
Конічне		$D_s = D \sqrt{2\left(1 + \frac{D_1}{D}\right)\frac{h}{D} + \left(\frac{D_1}{D}\right)^2}$ $\frac{h}{D} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(1 - \frac{D_1}{D}\right)^2 + \left(\frac{h}{D}\right)^2}$
Сферичне з бортом та фланцем		$D_s = D \sqrt{2 + \left(\frac{D_0}{D}\right)^2 + 4\frac{h}{D}}$

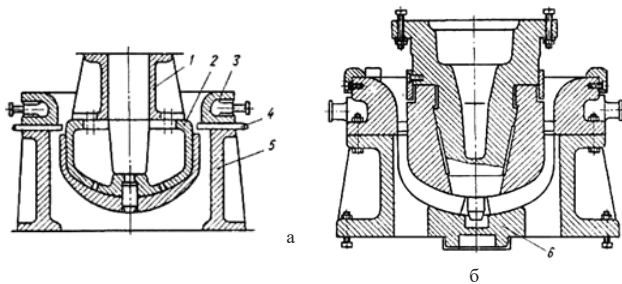


Рис. 13. Штамп для штампування днищ на провал

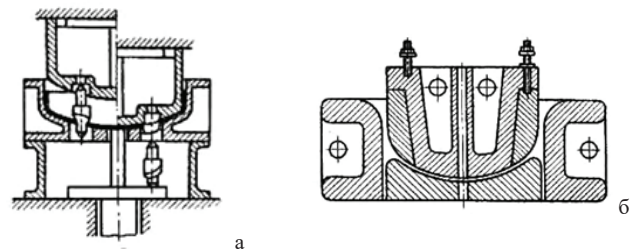


Рис. 14. Штампування днищ на дно

Спосіб штампування на дно доцільно використовувати для отримання днищ з точною формою дна, а також днищ з ексцентрично розташованими отворами. У цьому випадку матриця виконується глухою (рис. 14, а) або зі вставним дном (рис. 14, б). Остаточне формування днища відбувається в кінці робочого ходу. Видаляється воно за допомогою розташованого знизу виштовхувача з приводним гідроциліндром. Для запобігання утворення вигинів на нижній частині днища дно матриці виконується рухомим (його кріплять до плунжера гідроциліндра).

Розглянуті способи штампування зазвичай малоефективні під час виготовлення тонкостінних днищ з товщиною стінки до 25...30 мм. Для таких днищ розроблені (Moshnin E.N., 1967) технологічні процеси багатоперехідного штампування, засновані на застосуванні універсальних штампів. Витяжка днищ здійснюється з притиском за два або три переходи одним пуансоном при використанні набору матричних кілець відповідних діаметрів. Перед кожним переходом змінюють лише матричне кільце. Це дозволяє здійснювати штампування в універсальному штампі, який застосовується для звичайної витяжки більш товстостінних днищ. На першому переході формується центральна частина заготовки з наданням їй остаточної форми та розмірів, потім на наступних двох переходах послідовно формуються інші кільцеві ділянки заготовки (рис. 15).

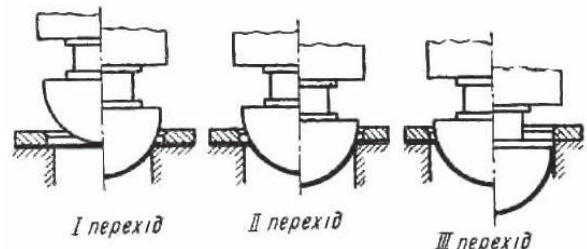


Рис. 15. Схема багатоперехідного процесу штампування днищ

На рис. 16 наведена схема секційного способу багатоперехідного штампування великогабаритних тонкостінних днищ. Заготовка 5 укладається на пуансон 6 і притискається до нього матрицею 4, закріпленою на повзуні 3. Вісь 7 разом з пуансоном 6 періодично повертається між черговими робочими ходами пуансона 2. Опори матриці перед початком робочого ходу пуансона 2 встановлюються в робоче положення, а перед початком повороту заготовки відсуваються вліво. Пуансон 2, періодично натискаючи на заготовку 5, деформує її на деяку глибину. Після одного повного оберту заготовки пуансон починає опускатися нижче і таким чином поступово формується готове днище.

У такий спосіб штампують днище із співвідношенням $\frac{\delta}{D} \cdot 100 \geq 0,5$, (δ – товщина стінки днища, D – його діаметр).

У великосерійному виробництві при штампівці днищ невеликих розмірів доцільно використовувати спосіб витяжки з перегином заготовки (рис. 17). Матриця складається з зовнішньої кільцевої частини 2 та внутрішньої матриці 3, виконаної по формі внутрішньої поверхні днища. Робоча поверхня пуансона 1 виготовлена у вигляді вузького кільця. Для виштовхування сформованого днища з матриці передбачено кільце 4, яке спирається на штирі 5 нижнього циліндру. У процесі витяжки середня частина заготовки обтягується по внутрішній матриці, а зовнішня – спочатку підгинається, а потім перегинається через ребро пуансона і притискається ним до внутрішньої матриці. Невеликі складки виправляються при перегинанні через ребро пуансона, а потім вдруге правляться при затисканні кромки заготовки між матрицею та пуансоном в кінці робочого ходу.

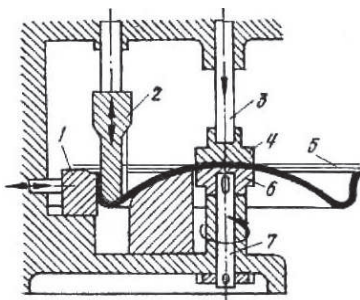


Рис. 16. Схема секційного способу штампування днищ

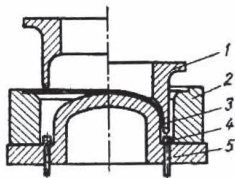


Рис. 17. Штампування днищ за способом витяжки з перегином заготовки

При штампуванні днищ важливе значення має визначення силових характеристик процесу. Зусилля притискання заготовки має бути достатнім для її утримання. Заготовка тисне на притискач внаслідок утворення складок та дії згинального моменту, що виникає в результаті згинання заготовки на заокругленнях матриці. За інших рівних умов для тонких заготовок необхідне більше питоме зусилля притискання, ніж для товстостінних. Зусилля притискання, достатнє для запобігання утворенню складок:

$$Q = 0,8\sigma_s \varphi'' \varphi \left(\frac{1}{k} - \varphi' \right) (1 - K^2) \frac{D_z^2}{\delta \cdot 100},$$

де D_z – діаметр заготовки; σ_s – межа міцності матеріалу; φ , φ' , φ'' – емпіричні коефіцієнти; δ – товщина заго-

товки; $K = \frac{D_{z,d}}{D_z}$ – коефіцієнт витяжки; $D_{z,d}$ – зовнішній діаметр днища.

У разі холодної витяжки $\varphi = 0,72 \dots 0,78$, $\varphi' = 0,95 \dots 1,0$ для $\varphi_r = 0,15 \dots 0,25$; $\varphi = 0,8 \dots 0,85$, $\varphi' = 1,1 \dots 1,5$ для $\varphi_r = 0,3 \dots 0,4$, де φ_r – відносне зменшення площі поперечного перерізу зразка з матеріалу, що деформується, на початку утворення шийки при розтягуванні. У разі гарячої витяжки $\varphi = \varphi' = 1$.

Коефіцієнт φ'' при холодному штампуванні знаходиться в межах 0,006...0,007, при гарячій – в межах 0,004...0,005.

Зусилля витяжки

$$P = \pi (D_{z,d} - \delta) \delta p,$$

де p – питомий тиск витягування.

Зусилля гарячого штампування зі змащенням та підігрівом, при якому $\frac{1}{k} = 1,3 \dots 1,6$:

$$P = C_1 (D_z - C_2 D_{z,d}) \sigma_B \delta,$$

де $C_1 = 1,5$; $C_2 = 0,6$.

Зазвичай штампування днищ проводиться зі змащенням, яке наносять на пуансон та матрицю. При холодному штампуванні в якості мастила застосовують машинне масло, при гарячій – суміш машинного масла та графіту. Для запобігання утворенню газових мішків від згоряння масла при штампуванні в пуансоні передбачають наскрізні отвори для виходу газів у внутрішню порожнину.

Технологічний процес виготовлення корпусу апарату закінчується складанням та зварюванням корпусу з окремих обичайок та зварюванням корпусу з днищем. При складанні обичайок стикові кромки зачищаються абразивом або металевою щіткою. Обичайки збираються та прихоплюються зварюванням по кільцевим швам на складальному стенді. Після вимірів корпусу по діаметру у місцях стикування виконується зварювання спочатку зовнішніх, а потім внутрішніх кільцевих швів.

Зазвичай збирання корпусів з обичайок і зварювання кільцевих стиків проводять на спеціальних складальних стендах. На рис. 18 показаний стенд для складання корпусів з обичайок діаметром 600...3600 мм і максимальною довжиною 9000 мм (Moshnin E.N., 1967). Скоба 7 для зовнішнього стикування обичайок діаметром 600...1100 мм переміщується у спеціальних напрямних, розташованих за роликівими опорами кантувача, зі швидкістю 10 м/хв, а пневмоскоба 3 для внутрішнього стикування обичайок діаметром 1200...3600 мм переміщується роликівими опорами кантувача зі швидкістю 11,4 м/хв. Реверсивне обертання стикованих обичайок зі швидкістю 3,8 м/хв здійснюється за допомогою кантувача 6 з приводними роликівими опорами, що самовстановлюються. Рухомий упор 12 переміщується рейковим шляхом між роликівими опорами зі швидкістю 11,4 м/хв.

При стикуванні обичайки діаметром 600...1100 мм укладаються на роликіві опори кантувача до положення упору в виступ 4 на пневмоскобі. Підтискання обичайок по торцях проводиться встановленим на рухомому упорі

пневмоциліндром 9 із зусиллям 35 кН, суміщення кромки обичайок – пневмоциліндром 8 із зусиллям 80 кН, розташованим на скобі для зовнішнього стикування. Після поєднання кромки виконують прихватку стику під зварювання.

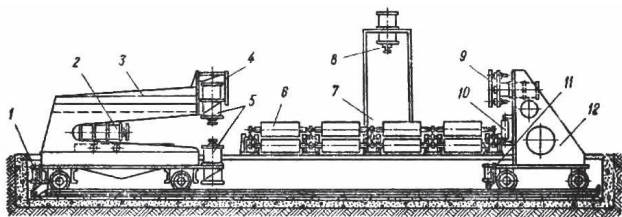


Рис. 18. Стенд для складання обичайок під зварювання кільцевих стиків

Стикування обичайок діаметром 1200...3600 мм виконують аналогічним чином, укладаючи обичайку на роликові опори кантувача так, щоб вона упиралася в ролики 10 рухомого упору.

Горизонтальний пневмоциліндр 2 з зусиллям 45 кН, встановлений на пневмоскобі для внутрішнього стикування, служить для підтискання обичайок, що стикуються по торцях, а вертикальні пневмоциліндри 5 з робочим зусиллям 80 кН кожен – для суміщення кромки. Після цього виконують прихватку стику під зварювання.

Пневмоскоба і рухомий упор фіксуються в заданому положенні спеціальними пневмоупорами 1 і 11, зблокованими з приводом руху. При складанні днища з корпусом кромки обичайки та днища зачищаються під зварювання на ширину 15...20 мм.

Поєднання кромки обичайки 3 і днища 1, що стикується, (рис. 19) досягається за допомогою стягую-

чих болтів, косинців і кільцевого пристрою 2, що охоплює вузол, з прорізами для електрозварювання. Для стикування можна використовувати також напрямні планки, які приварюються безпосередньо до корпусу та днища.

Зварювання кільцевого шва виконують спочатку ззовні, потім зсередини. Для апаратів діаметром менше 1200 мм спочатку виконують внутрішній шов, а потім зовнішній.

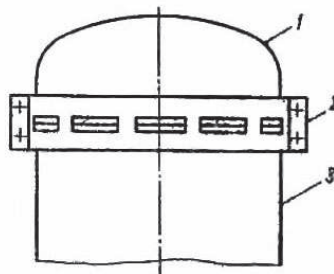


Рис. 19. Складання обичайки з днищем

Висновки. Приведена методика розрахунку розмірів та параметрів хімічних апаратів – обичайок та днищ, яка дозволяє побудувати послідовність їх виготовлення та забезпечити характеристики їх якості. Побудовані технологічні процеси та визначено обладнання, що використовується для досягнення високої продуктивності. Розглянуті способи усунення похибок розкрою та складання елементів хімічних апаратів. Проаналізовані процеси складання та з'єднання обичайок та днищ з метою забезпечення точності їх виготовлення.

Бібліографічні посилання:

1. Kovalenko I.V., Malinovsky V.V. (2005), *Osnovni protzessi, mashini ta aparati khimichnikh virobnitstv*. [Main processes, machines and devices of chemical industries], – K., Volia, 196 s. [in Ukrainian].
2. Novikov F.N., Andilakhai V.O. ta in. *Mekhanichna obrobka velikogabaritnikh detalei zi znosostiykimi naplavochnimi materialami*. (2015), [Mechanical processing of large parts with surfacing materials], Kharkiv: KHNEU im. S. Kuznetzia, - 312 s. [in Ukrainian].
3. Mikulenok I.O. (2022) *Vigotvlennia obladnannia khimichnikh virobnitstv*. [Manufacture of equipment for chemical industries], - K., NTUU (KPI), 233 s. [in Ukrainian].
4. Milevsky S.V. (2016), *Lokalne zmitznennia poverkhnevogo sharu*. [Local strengthening of the surface layer], *Visnik ZDTU*, N 3 s. 27-40. [in Ukrainian].
5. Taranenko G.V., Shtonda U.M. (2005). *Konstruivannia i rozrakhunok zvarnikh posuden ta aparativ*. [Design and calculation of welded vessels and devices] Lugansk, 310 s. [in Ukrainian].
6. Chemical and Pharmaceutical Equipements ,(2022). *Farbon aitec engineers./GIDC, Vatra Ahmedabad Gujarat*.
7. The manufacture of apparatus and chemicals, (2021). /Lous Bauman. Doi: 10.1126/science.45.1162.338a.

Pukhovskiy E. S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Frolov V. K., Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Prykhodko V. P., Candidate of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Betsko Yu. M., Senior Lecturer, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Technological problems of manufacturing body parts of chemical machines and apparatus

Modern heavy engineering is characterized by a significant proportion of small-scale and single forms of production. Machines produced for the metallurgical, energy, mining, chemical industries are characterized by high metal consumption and high labor intensity of their manufacture. For the manufacture of large-sized parts, either universal equipment and equipment with numerical control are used, or technological complexes are created based on the use of unique

equipment, large devices and conductors, and in some cases – original tools. Due to the specific features of the processing of heavy and large-sized parts and the low seriality of their production, in the development of technology it is impossible to mechanically introduce progressive methods and methods of processing, as well as the organization of work that are widely used in large-scale and mass production of industries not related to heavy engineering. When cutting these parts, there is often a need for original technical solutions (Technologia tiajelogo mashinostroenia, 1967).

The main tasks in the processing of heavy and large-sized parts are: achieving the required geometry of accuracy, surface roughness and physical and mechanical properties of the surface layer. Finishing operations, during which the physical and mechanical properties of the surface layer of massive parts are formed, and consequently, their performance, based on cutting of materials.

Processing large-sized parts is very time consuming, associated with a lot of time. Therefore, one of the main issues that have to be addressed in heavy engineering is to increase the processing productivity as a result of the use of advanced technological solutions, a further increase in production equipment, its specialization, mechanization and partial automation. A significant reserve for increasing labor productivity in heavy engineering is the rational organization of the production of large-sized parts, based on the use of group technological processes, typing of processes, normalization of equipment and tools, centralization of technological preparation of production, introduction of scientific and technological achievements.

Chemical and petroleum engineering and apparatus construction usually has an individual and small-scale nature of production. About 50% of chemical and petroleum equipment is manufactured according to individual orders and original models (Berliner V.I., Balashov U.A., 1976). In such conditions, technological preparation of production is especially difficult, characterized by the use of mainly universal metal cutting and forging and pressing equipment, low equipment with special equipment and devices, and the creation of temporary specialized technological processes.

Analysis of the designs of the devices shows that they mainly consist of the same type of parts and assembly units (shells, bottoms, hatches, fittings, supports, etc.). This predetermines the possibility of organizing in-line production. In the flow method of equipment production, specialized sites and workshops are created that work on the principle of in-line, mechanized lines that are reconfigured for the manufacture, processing and assembly of standard and normalized parts, assembly units and products (Vlasova G.B., Tchudevich D.A., Pivovarov N.A., 2022). Therefore, the problems of optimization of production and calculation of parameters of dimensional characteristics of the main parts – shells and bottoms of chemical devices – are extremely relevant.

The purpose of the work. Research of dimensional characteristics of blanks of body parts of chemical devices, their influence on manufacturing technology and quality parameters of parts, as well as optimization of the processing sequence in conditions of small-scale and single production.

Key words: chemical apparatus, shell, bottom, bending, stamping, forging and pressing equipment, welding.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СИРКОВИХ МАС ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОРОШКУ КАЛИНИ

Рижкова Таїса Миколаївнадоктор технічних наук, професор
Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
ORCID: 0000-0002-1029-8838
rijkova@gmail.com**Самілик Марина Михайлівна**кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-4826-2080
maryna.samilyk@snau.edu.ua**Болгова Наталія Вікторівна**кандидат сільськогосподарських наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-0201-0769
natalia.bolhova@snau.edu.ua**Губа Світлана Олександрівна**старший викладач
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-0546-7940
snau-okunevska@ukr.net**Соколенко Вікторія Вікторівна**старший викладач
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0001-8149-4919
viktoriya.tsygura@ukr.net

Кисломолочні продукти є основою харчового раціону людей різного віку та статті. Аналіз літературних джерел показав, що калина є надзвичайно перспективною сировиною для виробництва харчових продуктів. Для виробництва продукту зі збалансованим хімічним складом слід застосувати принцип комбінування сировини тваринного і рослинного походження. **Мета дослідження** – обґрунтування рецептури сиркових мас із використанням похідних продуктів переробки калини за рахунок оптимізації рецептурного складу. Під час виконання роботи використані стандартні, загально-прийняті методи досліджень. Для дослідження обрано три зразки: контроль (сиркова маса), 1-й – вміст калинового порошку 5%, 2-й – вміст калинового порошку 10%. **Результати дослідження.** Особливістю розробленої технологічної схеми є застосування калинових порошоків, виготовлених за технологією розробленою науковцями Сумського НАУ. Калиновий порошок, за розробленою технологією, вводиться в рецептуру разом з іншими компонентами, на стадії замішування. Рецептуру сиркових мас обрано за технологічною інструкцією для одержання готового продукту відповідно до вимог ДСТУ 4503:2005 «Вироби сиркові. Загальні технічні умови». Зразки сиркових мас з калиновим порошком мали однорідну, мазку консистенцію. За результатами сенсорного аналізу Зразок 1 отримав найвищі значення. За результатами досліджень всі показники відповідали вимогам ДСТУ. Кислотність Зразка 1 більша за кислотність Контролю, що пояснюється присутністю у складі калинових порошоків великої кількості органічних кислот. Встановлено, додавання калинового порошку призводить до зниження вологості готового продукту. Це пов'язано з тим, що харчові волокна, які містяться у калинових порошках мають здатність утримувати вологу. Гранична напруга зсуву контрольного зразка становить $305 \cdot 10^{-2}$ Па, а зразка з калиновим порошком – $316 \cdot 10^{-2}$ Па. Результати показали, що всі зразки мають пластичну, мазку структуру. Встановлено, запропонований вид наповнювача позитивно впливає на структурно-механічні властивості сиркової маси. **Висновки.** Плоди калини багаті біологічно активними речовинами, які добре зберігаються при переробці та зберіганні. Оптимальний відсоток внесення порошку калини 5. За всіма фізико-хімічними показниками, розроблений продукт, відповідає вимогам стандарту на сиркові маси.

Ключові слова: калиновий порошок, реологія, харчування, сиркова маса, органолептика, амінокислоти, рецептура, рослинний компонент.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.10>

Вступ. Кисломолочні продукти є основою харчового раціону людей різного віку та статті. В асортименті кисломолочних продуктів варто відзначити сиркові маси, які за своїм смаком найбільше подобаються дітям. Однак при їх виробництві використовуються цукор, ненатуральні смако-ароматичні добавки та структуроутворювачі. Аналізуючи сучасні тенденції в харчуванні перед виробниками та науковцями стоїть завдання створити корисну натуральну сиркову масу на основі сиру кисломолочного та рослинної сировини.

Сир кисломолочний має дієтичні та функціональні властивості, рекомендований для харчування дітей, вагітних жінок, при захворюванні нирок, серцево-судинної системи, анемії (Homayouni et al., 2012, Pan et al., 2018, Sahu, 2010, Kaur et al., 2022, Cena, Calder, 2020, Horyuk et al., 2016, Samilyk, 2017).

В якості рослинних добавок при виробництві сиркових мас часто використовують криопорошки (Ilinska et al., 2017, Nachak et al., 2019), кмину (Bolgova, Honchar, 2019), часнику (Bolgova, 2020), овочевих цукатів із пастернака та гарбуза (Samilyk et al., 2020), насіння кунжуту (Stetsenko, 2016), інулін (Abd El-Khair et al., 2020), соняшникового ізоляту (Bolgova et al., 2020).

Сучасна тенденція вдосконалення продуктів харчування орієнтована створення збалансованих за харчовою та біологічною цінністю продуктів, збагачених функціональними інгредієнтами. У продуктах зі складним сировинним складом молочне та рослинна сировина використовується в різних поєднаннях, що дозволяє формувати функціональні властивості, враховувати звички та традиції в культурі харчування населення різних регіонів.

В якості рослинного компоненту рецептури доцільно використовувати регіональну сировину. Ягоди калини здавна використовувалися українцями (Kraujalytė et al., 2013, Krüger et al., 2015). Ягоди містять багато вітаміну С, потужного антиоксиданту, пектин і танини, різні види цукру, дубильні речовини, флавоноїди, а також валеріанову, аскорбінову, пальмітинову та каприлову кислоти (Wei et al., 2019, Bal et al., 2011, Senica et al., 2016).

Свіжі ягоди калини мають неприємний, гіркий смак, пов'язаний з вмістом сапоніну, глікозиду та вінбурніну, які вважаються малотоксичними і потребують заморожування перед вживанням (Ozkan et al., 2020). Незважаючи на високу антиоксидантну активність (Polka et al, 2019), використання плодів калини в промислових масштабах, дуже обмежене (Rop et al., 2010).

Аналіз літературних джерел показав, що калина є надзвичайно перспективною сировиною для виробництва харчових продуктів, але слід підібрати правильну технологію її переробки, яка дозволить зберегти її біологічну цінність та забезпечити оптимальні органолептичні властивості готового продукту.

Отже, для виробництва продукту зі збалансованим хімічним складом цінністю слід застосувати принцип комбінування сировини тваринного і рослинного походження.

Матеріали і методи досліджень. Матеріалами дослідження були: сиркова маса та сиркова маса з калиновим порошком. *Мета дослідження* – обґрунтування рецептури сиркових мас із використанням похідних продуктів переробки калини за рахунок оптимізації рецептурного складу. Під час виконання роботи використані стандартні, загально-прийняті методи досліджень. Органолептичні показники досліджуваних зразків оцінювали по 5-бальній шкалі. Масова частка жиру визначалася відповідно до ДСТУ ISO 1735:2005. Визначення кислотності сиркових мас проводили методом титрування. Для дослідження обрано три зразки: контроль (сиркова маса), 1-й – вміст калинового порошку 5%, 2-й – вміст калинового порошку 10%. Спосіб виробництва сиркової маси з калиновим порошком передбачає: підготовку рецептурних компонентів (сир кисломолочний жирністю 9% протираємо, вершкове масло жирністю 82,5 % підтоплюємо), внесення калинового порошку, перемішування до однорідної маси, фасування, охолодження до $t = 4 \pm 2$ °С.

Результати дослідження. Особливістю розробленої технологічної схеми є застосування калинових порошоків, виготовлених за технологією розробленою науковцями Сумського НАУ (рис. 1) (Samilyk et al., 2022). Ягоди (калібровані, відмиті) попередньо заморожуються. Заморожування дозволяє знизити їх гіркість. Після дефростації проводиться осмотична дегідратація ягід при температурі 50°C у концентрованому цукровому сиропі (70%). При цьому із ягід видаляється частина клітинного соку (води). Видалення вологи відбувається за рахунок високого осмотичного тиску, створеного за рахунок концентрації сахарози в розчині. При цьому покращуються органолептичні властивості калини, зберігається біологічна цінність ягоди. Калинові порошки добре зберігаються, оскільки цукор являється консервантом. Частково зневоднені ягоди направляються на сушіння в інфрачервону сушарку, висушуються до вмісту вологи 7–8% при температурі 65°C. Сушені ягоди подрібнюються в порошки, які просіюються на фракції різних розмірів. Для досліджень використовували фракцію 0,45 мм. Калиновий порошок, за розробленою технологією, вводиться в рецептуру разом з іншими компонентами, на стадії замішування.

Рецептуру сиркових мас обрано за технологічною інструкцією для одержання готового продукту відповідно до вимог ДСТУ 4503:2005 «Вироби сиркові. Загальні технічні умови» (DSTU 4503:2005, 2006). Як контрольний зразок обрано рецептуру сиркової маси солодкої без добавок. Паралельно готували два зразки сиркової маси з калиновими порошками у кількості 5% (Зразок 1), 10% (Зразок 2) (табл. 1).

Зразки сиркових мас з калиновим порошком мали однорідну, мазку консистенцію. На рис. 2 представлено результати органолептичної оцінки досліджуваних зразків сиркових.

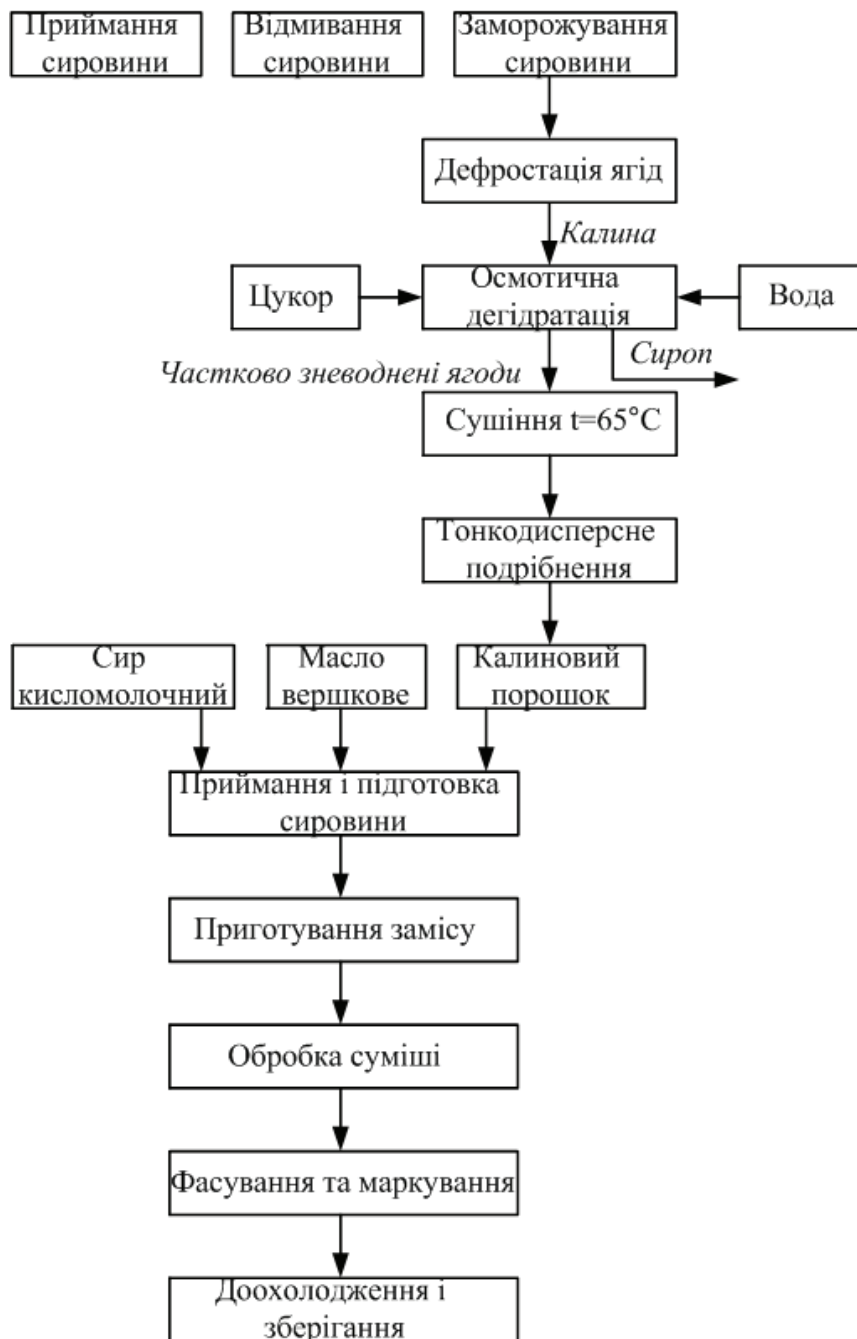


Рис. 1. Технологічна схема виробництва сиркових мас

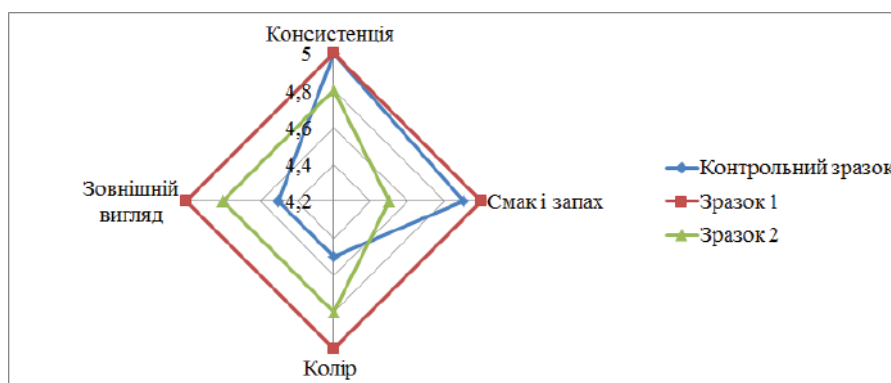


Рис. 2. Результати органолептичної оцінки

Таблиця 1

Рецептури досліджуваних сиркових мас

Сировина	Контроль	Зразок 1	Зразок 2
Сир кисломолочний з масовою часткою жиру 9 %	628,75	813,85	763,85
Масло вершкове з масовою часткою жиру 82,5 %	136,10	136,10	136,10
Цукор-пісок	235,10	-	-
Ванілін	0,05	0,05	0,05
Калиновий порошок	-	50,0	100,0
Разом	1000	1000	1000

За результатами сенсорного аналізу Зразок 1 отримав найвищі значення. Зразок 2 отримав найнижчу сенсорну оцінку, що пов'язано із відчуттям калинової гіркоти і кислого смаку. Враховуючи результати органолептичної оцінки для подальших досліджень були використані два зразки: Контроль, Зразок 1 (табл. 2).

Таблиця 2

Результати дослідження фізико-хімічних показників

Показники	Нормативний показник	Зразок 1
Кислотність, °Т	151	154
Масова частка жиру, %	12	8
Масова частка вологи, %	78	75,5
Масова частка сахарози, %	7,3	5,2

За результатами досліджень всі показники відповідали вимогам ДСТУ. Кислотність Зразка 1 більша за кис-

лотність Контролю, що пояснюється присутністю у складі калинових порошоків великої кількості органічних кислот. Встановлено, додавання калинового порошку призводить до зниження вологості готового продукту. Схожі результати були отримані (Ali et al., 2022, Tratnik et al., 2001). Це пов'язано з тим, що харчові волокна, які містяться у калинових порошках мають здатність утримувати вологу.

Оцінку реологічних властивостей, а саме щільності структури сирної маси, провели за допомогою пенетрометра, визначивши напругу зсуву. Результати показали, що всі зразки мають пластичну, мазку структуру. Гранична напруга зсуву контрольного зразка становить $305 \cdot 10^{-2}$ Па, а зразка з калиновим порошком – $316 \cdot 10^{-2}$ Па. Встановлено, запропонований вид наповнювача позитивно впливає на структурно-механічні властивості сиркової маси.

До складу порошку калини входять 18 амінокислот (рис. 3) у кількості 4,63 г/100 г, з них незамінних амінокислот виявлено у кількості 1,63 г/100 г (ізолейцин-0,17; лейцин – 0,37; лізин – 0,24; метіонін – 0,07; фенілаланін – 0,23; треонін – 0,19; валін – 0,23).

Лейцин, ізолейцин та валін вважаються амінокислотами з розгалуженими, бічними ланцюгами. Вони займають практично 40% всіх амінокислот, яких потребують м'язи. Лейцин – підтримує енергетичний баланс, ізолейцин – споживає вироблену глюкозу, а значить, має антикатаболічні властивості, а валін – є стимулятором, що активує імунні сили, метаболізм, мозкову активність. Тобто ці амінокислоти є джерелом енергії, завдяки яким і забезпечується синтез трикарбонових кислот і глюконеогенезу в організмі спортсменів.

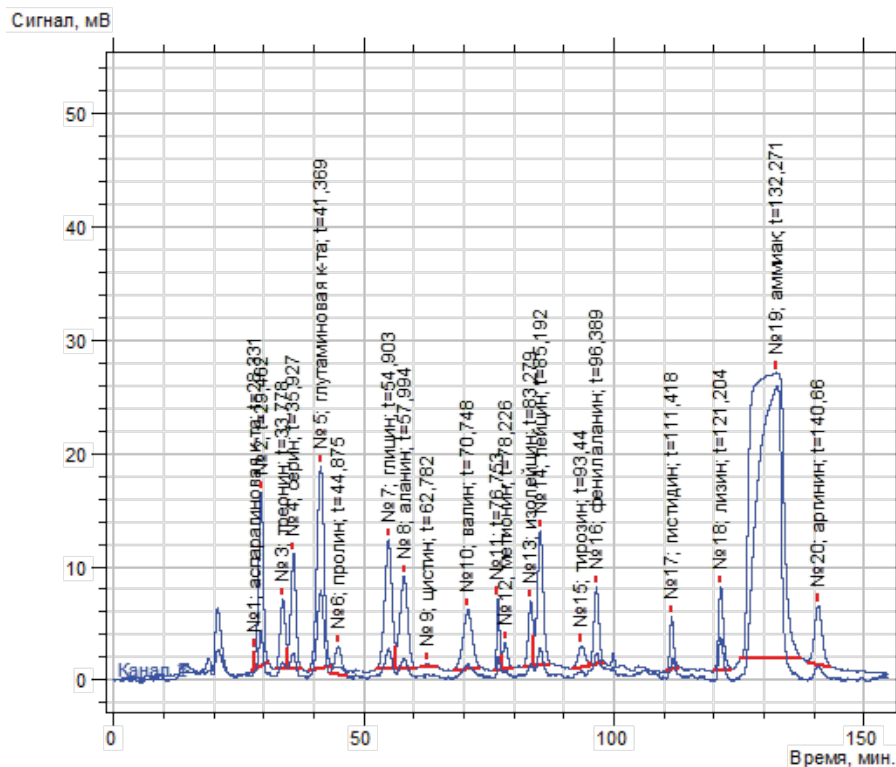


Рис. 3. Амінокислотний профіль калинових порошоків

Фенілаланін є протейногенною амінокислотою та входить до складу білків усіх відомих живих організмів. Беручи участь у гідрофобних та стекінг-взаємодіях, фенілаланін відіграє значну роль у фолдингу та стабілізації білкових структур, є складовою функціональних центрів.

Крім того, у порошок каліни виявлено незамінну амінокислоту метіонін (0,07 г/100 г). Вона добре впливає на стан нирок, знижує токсичність багатьох отруйних речовин і сприяє відновленню функцій печінки.

Враховуючи амінокислотний склад отриманих за розробленою технологією порошоків каліни, можна пропонувати розроблений продукт для харчування населення як функціональний.

В планах подальших досліджень визначення впливу порошоків каліни на процеси окислення жиру та показники безпечності.

Висновки. Калина є широко поширеною рослиною, що росте на всій території України. Плоди багаті біоло-

гічно активними речовинами, які добре зберігаються при переробці та зберіганні. Це дозволяє розглядати плоди каліни як регіональну сировину для виробництва харчових продуктів.

Проведені дослідження показали, що використанню порошоків каліни має позитивний вплив на органолептичні показники кисломолочних продуктів. Встановлено оптимальну дозу внесення порошоків каліни (5%), при якій сировині маси характеризуються найкращими сенсорними показниками.

Аналіз амінокислотного складу порошоків каліни свідчить про відсутність лімітованих амінокислот і досить високу їх біологічну цінність. В рецептурному компоненті міститься 18 амінокислот, в тому числі 7 незамінних.

За всіма фізико-хімічними показниками, розроблений продукт, відповідає вимогам стандарту на сировині маси. Встановлено, що додавання калінового порошоків призводить до зниження вологості готового продукту.

Бібліографічні послання:

1. Abd El-Khair, A. A., Abd-Alla, A. A., and Amany, & Ahmed, G. M. (2020). Chemical composition and yield of fat-free soft cheese produced with the addition of some dried dairy ingredients and inulin by. *Egyptian J. Dairy Sci*, 48, 35-43.
2. Bal, Lalit M., Meda, Venkatesh, Naik, S. N., & Satya, Santosh (2011). Sea buckthorn berries: A potential source of valuable nutrients for nutraceuticals and cosmeceuticals *Food Research International*, 44, 1718-1727. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.002>
3. Bolgova, N., & Honchar, A. (2019). Justification of the formulation for cheese paste with cumin. *Food resources*, 7(13), 44-50. <https://doi.org/10.31073/foodresources2019-13-04> (in Ukrainian).
4. Bolgova, N., Liakh, V., & Sheptun, R. (2020). Syrkova pasta z chasnykom. [Curd paste with garlic]. *Zbirnyk naukovykh prats Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnogo universytetu*, 20(1), 237-245. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-20-1-237-245> (in Ukrainian).
5. Bolgova, N., Tsyhura, V., & Khmeliuk, T. (2020). Innovative Aspects of Sunflower Isolate Use in Technology of Craft Products. *Restaurant and hotel consulting. Innovations*, 3, 252-261. <https://doi.org/10.31866/2616-7468.3.2.2020.219709> (in Ukrainian).
6. Cena, H., & Calder, P. C. (2020). Defining a Healthy Diet: Evidence for The Role of Contemporary Dietary Patterns in Health and Disease. *Nutrients*, 12(2), 334. <https://doi.org/10.3390/nu12020334>
7. DSTU 4503:2005. Vyroby syrkovi. Zahalni tekhnichni umovy. [Cottage cheese products. General specifications] Kyiv, 2006. 17 p. (in Ukrainian).
8. Hachak, Y., Slyvka, N., Gutyj, B., Vavrysevych, J., Sobolev A., Bushueva, I., Samura, T., Paladiychuk, O., Savchuk, L., & Pikhtirova, A. (2019). Effect of the cryopowder "beet" on quality indicators of new curd desserts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(11(97)), 52–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154942>
9. Homayouni, A., Alizadeh, M., Alikhah, H., & Zijah, V. (2012). Functional dairy probiotic food development: trends, concepts, and products. In E. Rigobelo (Ed.), *Probiotics*, 197-212. <http://dx.doi.org/10.5772/48797>
10. Horyuk, Y., Kukhtyn, M., Perkiy, Y., Horyuk, V., & Semenyuk, V. (2016). Identification of enterococcus isolated from raw milk and cottage cheese «home» production and study of their sensitivity to antibiotics. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary Sciences*, 18(3(70)), 44-48. <https://doi.org/10.15421/nvlvet7011> (in Ukrainian).
11. Ilinska, A., Benytska, A., Prystanskyi, R. (2017). Krioporoshky v yakosti bio-dobavok u molochnykh produktakh LPN. [Cryopowders as bioadditives in dairy products of therapeutic and preventive application]. *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii 6 zbirnyk tez dopovidei n. t. konferentsii molodykh uchenykh ta studentiv. Ternopil*, 174–175. (in Ukrainian).
12. Kaur, H., Kaur, G., & Ali, S. A. (2022). Dairy-Based Probiotic-Fermented Functional Foods: An Update on Their Health-Promoting Properties. *Fermentation*, 8, 425. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090425>
13. Kraujalytė, V., Venskutonis, P.R., Pukalskas, A., Česonienė, L., & Daubaras, R. (2013). Antioxidant properties and polyphenolic compositions of fruits from different European cranberrybush (*Viburnum opulus* L.) genotypes. *Food Chem*, 141(4), 3695–702. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.06.054>
14. Krüger, S., Mirgos, M., & Morlock, G. E. (2015). Effect-directed analysis of fresh and dried elderberry (*Sambucus nigra* L.) via hyphenated planar chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1426, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.11.021>
15. Marina M. Samilyk, Evgenia V. Demidova, & Natalia V. Bolgova (2022). Waste-free technology of processing wild plant raw materials. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(3), 394-403.
16. Mateja, Senica, Franci, Stampar, Robert, Veberic, & Maja, Mikulic-Petkovsek. (2016). Processed elderberry (*Sambucus nigra* L.) products: A beneficial or harmful food alternative? *LWT – Food Science and Technology*, 72, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.056>

17. Muhammad Bahadur Ali, Mian Shamas Murtaza, Muhammad Shahbaz, Aysha Sameen, Saima Rafique, Rizwan Arshad, Nighat Raza, Zainab Akbar, Ghazala Kausar, Adnan Amjad. (2022). Functional, textural, physicochemical and sensorial evaluation of cottage cheese standardized with food grade coagulants. *Food Sci. Technol, Campinas*, 42, e33420. <https://doi.org/10.1590/fst.33420>
18. Ozkan, G., Ercisli, S., Ibrahim, H., & Gulce, S. (2020). Diversity on fruits of wild grown European cranberrybush from coruh valley in Turkey. *Erwerbsobstbau*, 62(3), 275–279. <https://doi.org/10.1007/s10341-020-00489-8>
19. Pan, L., Yu, J., Mi, Z., Mo, L., Jin, H., Yao, C., Ren, D., & Menghe, B. (2018). A metabolomics approach uncovers differences between traditional and commercial dairy products in buryatia (Russian Federation). *Molecules*, 23(4), 735. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules23040735> PMID:29565828
20. Polka, D., Podsedek, A. & Koziolkiewicz, M. (2019). Comparison of Chemical Composition and Antioxidant Capacity of Fruit, Flower and Bark of *Viburnum opulus*. *Plant Foods Hum Nutr*, 74, 436–442. <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00759-1>
21. Rop, O., Reznicek, V., Valsikova, M., Jurikova, T., Mlcek, J., & Kramarova, D. (2010). Antioxidant properties of Guelder rose (*Viburnum opulus* var. *edule*). *Molecules*, 15(6), 4467–4477. <https://doi.org/10.3390/molecules15064467>
22. Sahu, J. K. (2010). Coagulation kinetics of high pressure treated acidified milk gel for preparation chhana (an Indian soft cottage cheese). *International Journal of Food Properties*, 13(5), 1054–1065. <http://dx.doi.org/10.1080/10942910902950542>
23. Samilyk, M. (2017). Improving the technology of soft sour milk cheese by increasing biological value. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Bio-technologies*. 19(80), 33–37. <https://doi.org/10.15421/nvlvet8007> (in Ukrainian).
24. Samilyk, M., Helikh, A., Bolgova, N., Ryzhkova, T., Sirenko, I., & Fesyun, O. (2020). Substantiation of the choice of fillers for cottage cheese masses. *Eureka: Life Sciences*, 2, 38–45. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2020.001210>
25. Stetsenko, N. O. (2016). Rozroblennia syrkovoi masy z roslыnnym napovnuvachem dlia herodiietychnoho kharchuvannia. [Development of curd mass with vegetable filler for herodietic nutrition]. *Problemy starenija i dolgoletija*, 25(2), 280–286. (in Ukrainian).
26. Tratnik, L., Božanić, R., Mioković, G., & Šubarić, D. (2001). Optimization of manufacture and quality of Cottage cheese. *Food Technology and Biotechnology*, 39, 43–48.
27. Wei, E., Yang, R., Zhao, H., Wang, P., Zhao, S., Zhai, W., Zhang, Ya., & Zhou, H. (2019). Microwave-assisted extraction releases the antioxidant polysaccharides from seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) berries. *International Journal of Biological Macromolecules*, 13(123), 280–290. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.074>

Samilyk M. M., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Bolgova N. V., PhD, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Huba S. O., Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Sokolenko V. V., Senior Lecturer, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Improvement of the technology of curd masses using viburnum powder

Dairy products are the basis of the diet of people of all ages and status. An analysis of literary sources showed that viburnum is a promising raw material for food production. For the production of products balanced by the chemical composition, a combination of raw materials of animal and vegetable origin should be used. The purpose of the study is to substantiate the formulation of curd masses using derivative products of viburnum processing. When performing the work, standard, generally accepted research methods were used. Three samples were selected for the study: control (curdled mass), 1st – the content of viburnum powder 5%, 2nd – the content of viburnum powder 10%. Research results. A feature of the developed technological scheme is the use of viburnum powders made according to the technology developed by scientists of Sumy NAU. Viburnum powder, according to the developed technology, is introduced into the recipe along with other components at the mixing stage. The recipe of the curd masses was chosen according to the technological instructions for obtaining the finished product in accordance with the requirements of DSTU 4503:2005 “Curd products. General technical conditions”. Samples of curd masses with viburnum powder had a homogeneous, smearing consistency. According to the results of sensory analysis, Sample 1 received the highest values. According to the research results, all indicators met the requirements of DSTU. The acidity of Sample 1 is higher than the acidity of Control, which is explained by the presence of a large amount of organic acids in the composition of viburnum powders. It has been established that the addition of viburnum powder leads to a decrease in the moisture content of the finished product. This is due to the fact that the dietary fiber contained in viburnum powders has the ability to retain moisture. The limiting shear stress of the control sample is 305·10⁻²Pa, and that of the sample with viburnum powder is 316·10⁻²Pa. The results showed that all samples have a plastic, smearing structure. It has been established that the proposed type of filler has a positive effect on the structural and mechanical properties of the curd mass. Findings. Viburnum fruits are rich in biologically active substances that are well preserved during processing and storage. The optimal percentage of adding viburnum powder is 5. According to all physical and chemical indicators, the developed product meets the requirements of the standard for curd masses.

Key words: viburnum powder, rheology, nutrition, curd mass, organoleptics, amino acids, recipe, herbal component.

ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ДОРОЖНЬОГО РУХУ ПЕРЕХРЕСТЯМ МІСТА

Соларьов Олександр Олексійович

кандидат технічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-1485-0685

solarov.oleksandr@snau.edu.ua

Саржанов Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0003-3973-0185

alexsar@i.ua

Організація дорожнього руху складними перехрестями має досить важливе значення, так як, близько 80% дорожньо-транспортних пригод виникають саме на таких ділянках дороги. У даній статті розглянуте перехрестя міста Суми, яке відноситься саме до таких аварійно небезпечних ділянок дороги. Розглядається перехрестя вулиць Харківської, Героїв Сумщини, Гагаріна та Покровської площі, що знаходиться в центральній частині міста та є важливим вузлом на перетині магістральних транспортних коридорів міста.

Аналізуючи ситуацію на цій ділянці дороги дійшли висновку, що дослідження та аналіз руху транспортних засобів цим перехрестям має важливе прикладне значення для міста. На перехресті виявлено ряд факторів, які сприяли виникненню дорожньо-транспортних пригод, деякі з цих факторів провокують на порушення правил дорожнього руху, також конструктивно створене перехрестя має досить велике навантаження, що призводить до ускладнень роз'їзду транспортних засобів та виникненню дорожньо-транспортних пригод. За проаналізованими даними з 2018 по 2021 рік було зафіксовано 17 дорожньо-транспортних пригод. В статті наведено дані по роках де видно, що аварійність перехрестя збільшується, з кожним роком. Якщо порівняти 2018 та 2020 роки, то аварійність виросла в 4 рази. При порівнянні 2020 та 10 місяців 2021 року, аварійність виросла 2,5 рази. При порівнянні 2018 та 10 місяців 2021 року, аварійність виросла в 10 разів. Під час аналізу та моделювання використовувалося сучасне програмне забезпечення PTV VISSIM. Для моделювання оптимізованого перехрестя було дороблено пофазний роз'їзд та циклограму з урахуванням правих поворотів та окремо від руху прямо лівого повороту з вул. Героїв Сумщини, з високою інтенсивністю руху. З вулиці Гагаріна ліворуч потік складає до 30 авто/год., з Покровської площі праворуч потік – до 15 авто/год.

Таким чином, було розроблено поетапну програму впровадження заходів, які б сприяли підвищенню безпеки руху цим перехрестям. Найкращим рішенням для досліджуваного перехрестя є збереження світлофорного регулювання зі впорядкуванням площі перехрестя (між стоп-лініями) та створення безконфліктного пофазного роз'їзду. Було розроблено програму впровадження змін для перехрестя у 3 етапи: 1 етап – основний, 2 етап – через 2-3 роки після впровадження 1 етапу, 3 етап – через 4-5 років після впровадження 2 етапу.

Ключові слова: рух транспорту, перехрестя, організація руху, транспортний потік.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.11>

Вступ. Перехрестя вулиць Харківської, Героїв Сумщини, Гагаріна та Покровської площі у м. Суми розташоване по правому березі річки Псел на межі історичного і фактичного центру міста, є важливим вузлом на перетині магістральних транспортних коридорів міста.

Вулиця Харківська, Героїв Сумщини та Покровська площа є вулицями загальноміського значення регульованого руху, вулиця Гагаріна – районного значення. На рис. 1 зображено місце розташування досліджуваного об'єкту.

Поточний стан перехрестя зображено на рис. 2.

Перехрестя має дуже великі розміри: 96 м між стоп-лініями по вул. Харківській та Покровської площі та 50 м по вулицях Гагаріна і Героїв Сумщини. Кількість автомобілів на дорогах України постійно зростає, що призводить до затруднення проїздів перехресть та збільшення кількості аварійних випадків (Shirokun, 2018; Vinokurov, 2020). Таким чином нами було вирішено дослідити одне з найнебезпечніших перехресть міста Суми та знайти можливі шляхи вирішення даного питання.

Матеріали і методи досліджень. Перехрестя регулюється світлофором з 3-фазним регулюванням, де регулюються основні напрями руху: вул. Харківська – Покровська пл., Харківська – Гагаріна та Покровська пл. – Героїв Сумщини (DBN, 2001; DBN, 2002; Osetrin M., 1997). Постійно зелена стрілка з Героїв Сумщини на Покровську пл. та з Харківської на Героїв Сумщини. З боку вулиці Героїв Сумщини є нерегульований пішохідний перехід, який сягає довжину 20 метрів. Реалізована зелена хвиля між перехрестями Харківська – Покровська пл. та світлофором поблизу Мануфактури. Також відомо що перехідні фази не дозволяють вчасно покинути перехрестя, якщо їхати з Героїв Сумщини на Гагаріна, і останнім авто доводиться гальмувати перед пішохідним переходом, оскільки автомобілі покинули перехрестя, але наблизились до регульованого пішохідного переходу, коли вмикається зелене світло, на вул. Гагаріна. Час циклу світлофора складає 130 секунд: 37 секунд Харківська – Покровська; 25 секунд

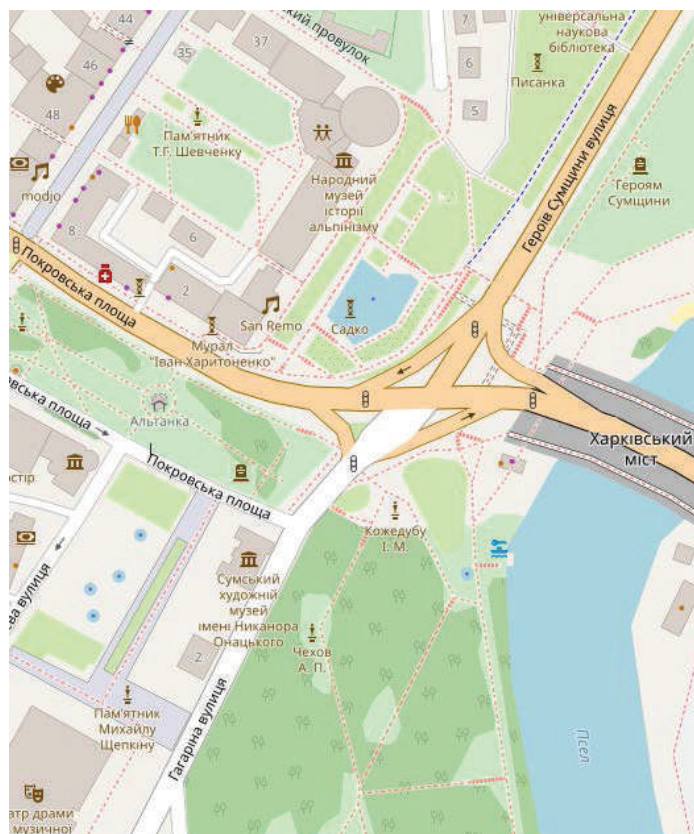


Рис. 1. Картографічне розташування перехрестя



Рис. 2. Поточний стан перехрестя

Харківська – Гагаріна та Покровська – Героїв Сумщини. Остання фаза: Гагаріна – Героїв Сумщини має таке налаштування: 56 секунд для повороту з Героїв Сумщини на Харківську та руху прямо на Гагаріна та 30 секунд з Гагаріна на Героїв Сумщини. Також є окрема фаза для руху з Гагаріна на Харківську – 93 секунди. Крім згаданих є ще фази з зеленою стрілкою: Героїв Сумщини – Покровська пл. та Харківська – Героїв Сумщини.

Щодо існуючих потоків транспорту то можна сказати:

А) вранці з 7:00 до 8:00 потік транспорту наведений на рисунку 3.

Б) ввечері з 17:00 до 18:00 потік транспорту наведений на рис. 4.

При обстеженні даного перехрестя було виявлено такі фактори:

- Крайня права смуга з Покровської площі має ширину 4 метри, що більше ніж передбачено ДБН 2.3-5: 2018 «Вулиці та дороги населених пунктів». Максимально дозволена ширина смуги руху – 3,75 м.

- Пішохідний перехід по вул. Героїв Сумщини знаходиться поза радіусом перехрестя та є нерегульованим через що транспорт має постійно зупинятися, коли пішоходи переходять через цей перехід.

- При русі з вулиці Гагаріна на вулицю Героїв Сумщини ширина смуги між першою стоп-лінією та стоп-лінією на перехресті складає 6 метрів, тоді як ширина

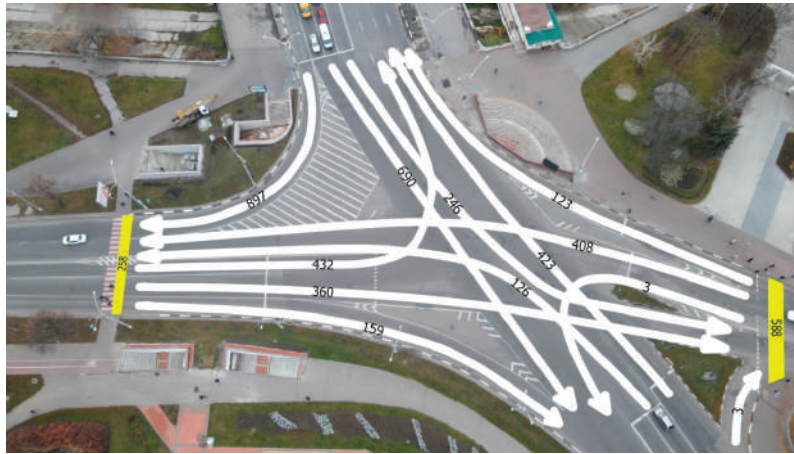


Рис. 3. Існуючі пікові потоки транспорту (вранішній час)

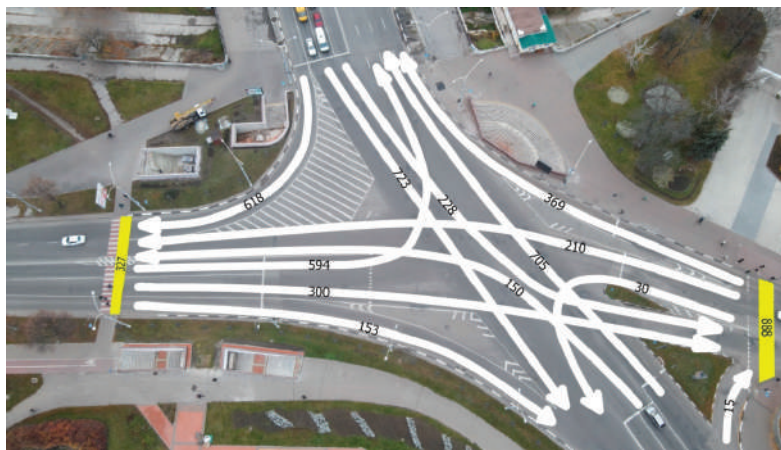


Рис. 4. Існуючі пікові потоки транспорту (вечірній час)

смуги руху на вул. Героїв Сумщини складає 3,5 метра, через що частина водіїв робить перестроювання в недозволеному місці.

- Також помічені найуразливішу групу учасників дорожнього руху – велосипеди. При наявній організації дорожнього руху, на перехресті, за винятком поворотів з Гагаріна на Харківську, з Героїв Сумщини на Покровську пл., з Харківської на Героїв Сумщини, порушують правила дорожнього руху.

- Помічено також, що водії, які рухаються з Героїв Сумщини на Харківську повертають раніше дозволеного, іншими словами їдуть через подвійну суцільну.

- Потік, який їде з Героїв Сумщини на Харківську пропускає потік, який рухається з Гагаріна на Героїв Сумщини.

Окрім дрібних порушень, це перехрестя ще є аварійно-небезпечною ділянкою (Osetrin, 1997; Lobashov, 2010). За проаналізованими даними з 2018 по 10-й місяць 2021 року було зафіксовано 17 ДТП. Якщо розподілити по вказаних роках, то можна отримати рис. 5.

З рис. 5 видно, що аварійність перехрестя збільшується, з кожним роком. Якщо порівняти 2018 та 2020 роки, то аварійність виросла в 4 рази. При порівнянні 2020 та 10 місяців 2021 року, аварійність виросла 2,5 рази. При порівнянні 2018 та 10 місяців 2021 року, аварійність виросла в 10 разів.

Результати досліджень. Для покращення показників перехрестя пропонується його привести до вигляду стандартних європейських перехресть, як це показано на рис. 6.

Такий принцип організації дозволяє забезпечити не тільки добру пропускну здатність, а ще і високі показники доступності (наземні переходи). На розглянутому перехресті є проблеми з доступністю: перехід через вулицю Харківська та Покровська площа не є доступними. А підземний перехід, який там є, ніяк не сприяє доступності для маломобільних груп населення і після ремонту не буде сприяти. Саме тому на перехресті можливо створити умови для безбар'єрного простору (Savenko et. al., 2011; Sylianov et. al., 2009).

Саме завдяки безконфліктному регулюванню транспортних та пішохідних потоків, підвищується безпеку руху та швидкість проїзду перехрестя, не потрібно гальмувати та пропускати інших учасників – проїзд у будь-якому напрямку відбувається вільно і без затримок на зелений сигнал світлофора.

Каналізовані праві повороти напрямними острівцями, які зараз розмічені фарбою допоможуть вивести потоки пішоходів та велосипедистів, таким чином розділити перетин ними перехрестя на коротші відрізки, що можуть регулюватися окремо рис. 6. Саме перехрестя

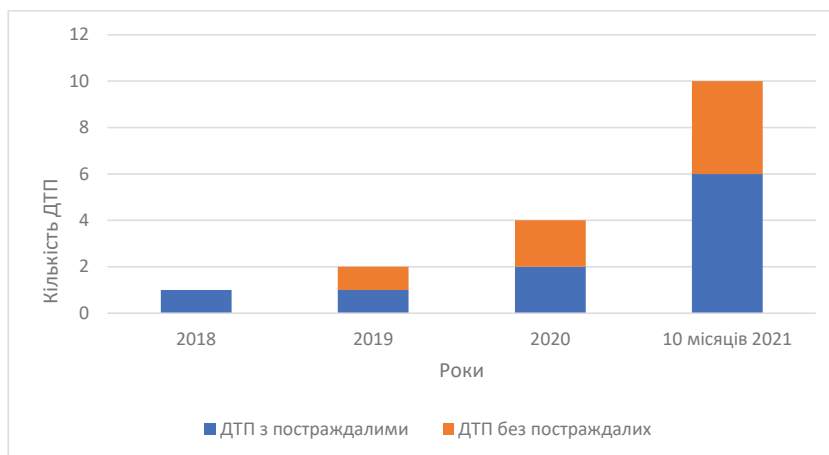


Рис. 5. Кількість ДТП з 2018 по 2021

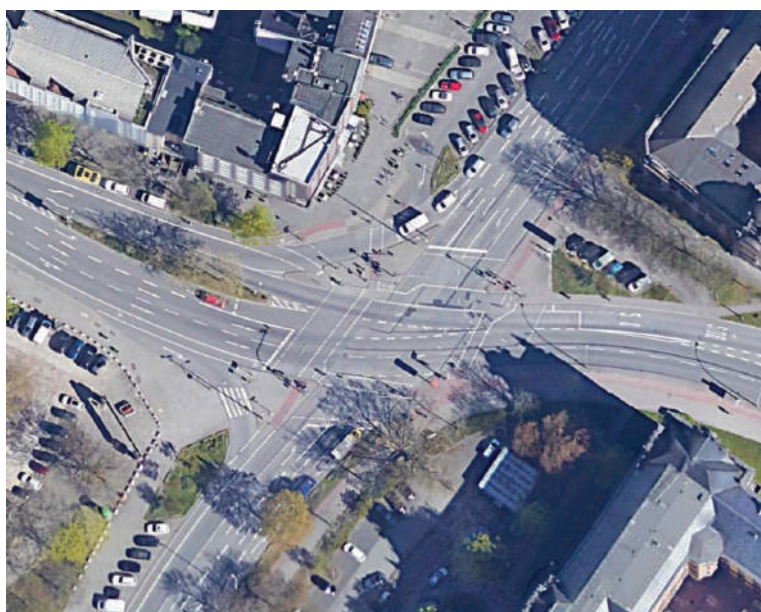


Рис. 6. Стандартне оптимізоване перехрестя у Європі

при цьому зменшується до регулювання лише прямих та лівоповоротних напрямків, а переходи розміщуються максимально впритул до перехрестя, а не віднесені за радіус, перехрестя стає більш компактним, що скорочує і час переходу пішоходів, і проїзду транспорту.

Влаштування смуги для громадського транспорту, з Харківської, в напрямку центру, дозволить прискорити рух маршрутних транспортних засобів та об'єднає відрізок на Покровській площі.

Основні проектні рішення:

1. Звуження ширини смуги руху на Покровській площі – до 3 метрів та вул. Гагаріна – до 3,6 м, задля забезпечення повороту з Гагаріна на Покровську площу та Героїв Сумщини – до 3,6 м, задля убезпечення попутних зіткнень.

2. Загалом перехрестя повністю вписане в існуючу площу асфальтного покриття.

3. Каналізування правоповоротних потоків у проїздах завширшки по 5 м (з урахуванням бокового виносу в кри-

вій) фізично відокремлені з трьох сторін конструктивно виділеними напрямними острівцями, на які виведено пішохідні переходи та велосипедні переїзди. Правий поворот між вул. Харківська та Героїв Сумщини додатково регульований для підвищення безпеки руху пішоходів та велосипедистів через інтенсивний рух.

4. Велосипедні переїзди та велосипедні смуги передбачено з усіх сторін перехрестя та на всіх підходах по вулицях.

Для моделювання оптимізованого перехрестя було дороблено пофазний роз'їзд та циклограму з урахуванням каналізованих правих поворотів та окремо від руху прямо лівого повороту з Г. Сумщини, з високою інтенсивністю руху. З вул. Гагаріна ліворуч потік складає до 30 авто/год., з Покровської пл. праворуч потік – до 15 авто/год. тому каналізування є недоцільним, що також показало моделювання в програмному середовищі VISSIM. Циклограма складає 131 с (на 1 с довше існуючої) і має 4 фази. Пофазний роз'їзд на перехресті показано на рис. 7.

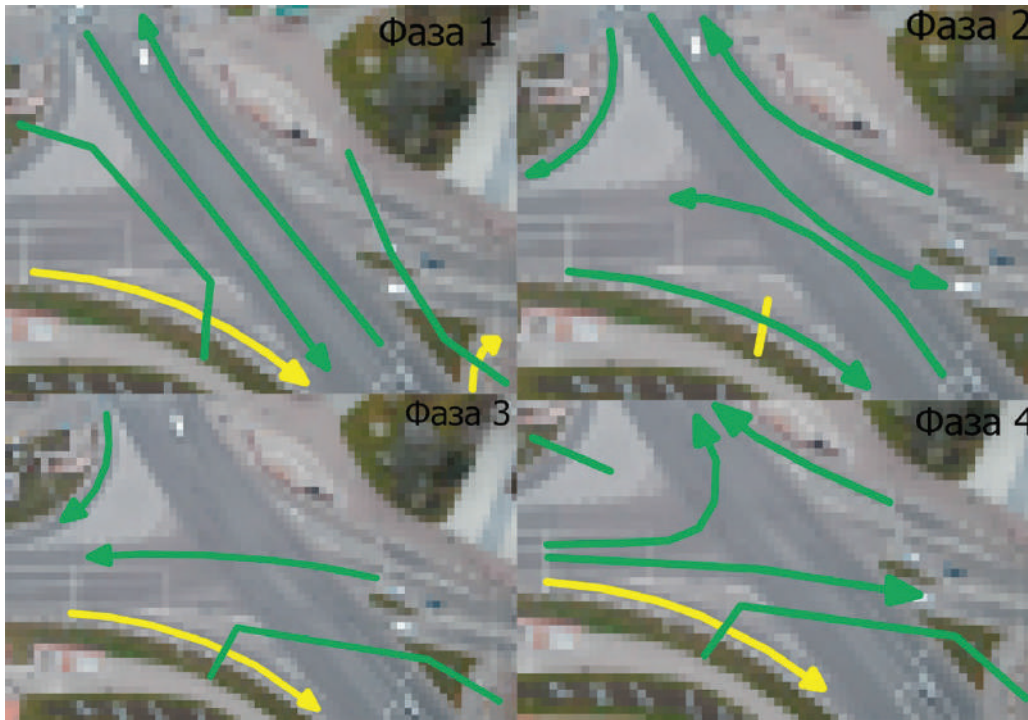


Рис. 7. Пропонований пофазний роз'їзд

Час кожної фази: Фаза 1 – 37 с; Фаза 2 – 25 с; Фаза 3 – 25 с; Фаза 4 – 29 с.

Перехідний сигнал (1 секунда), для безпечного і безконфліктного розведення потоків.

При аналізі існуючого стану та пропонуваного рішення виявилось, що пропонуване рішення є кращим за існуючий стан, якщо розглядати їх за такими параметрами:

- час простою;
- зупинки;
- затримки.

Результати можна оглянути в таблиці 1. Дані вказують середні значення.

Найкращим рішенням для досліджуваного перехрестя є збереження світлофорного регулювання зі впорядкуванням площі перехрестя (між стоп-лініями) та створення безконфліктного пофазного роз'їзду (Biliatynskiy, 1997; Navrylov et al., 2007).

Комп'ютерне моделювання, у VISSIN, показало, що пропонуване регульоване перехрестя понизить показники часу простою, зупинок, затримок.

Обговорення. Оскільки капітальний ремонт або реконструкція буде коштувати чимало, саме тому пропонується по-етапне виконання щодо даного перехрестя.

Етап 1. Встановлення світлофорів на виїзд з вул. Харківської, на каналізованому острівці. Переміщення переходу з Героїв Сумщини ближче до перехрестя. Додання смуги громадського транспорту на мосту, задля гармонізації зі смугою маршрутних транспортних засобів на Покровській площі, також необхідно встановити світлофор для громадського транспорту. Відновлення пішохідного переходу через Покровську пл. та встановлення

пішохідного світлофору. Розмітити велопереїзди на всіх під'їздах до перехрестя. Встановлення антипаркувальних стовпчиків, задля чіткішого каналізування потоків, щоб унеможливити порушення правил дорожнього руху. Встановити детектори щоб не допустити забивання перехрестя через надлишкову пропускну здатність.

Таблиця 1

Результати замірів поточного і пропонуваного варіанту

Вечір			
	Час простою (с)	Зупинки	Затримки (с)
Вечір (поточний стан)	34,86	3,45	73,03
Вечір (пропонуваний варіант)	15,88	1,98	33,27
Різниця	18,98	1,47	39,76
Ранок			
	Час простою (с)	Зупинки	Затримки (с)
Ранок (поточний стан)	36,00	3,41	77,79
Ранок (пропонуваний варіант)	7,36	0,96	23,49
Різниця	28,64	2,45	54,30

Етап 2. Впровадження через 2-3 роки після впровадження 1-го етапу. Відокремлення крайньої правої смуги з Покровської пл. на вул. Харківську для смуги громад-

ського транспорту. Підключення світлофору до мережі світлофорів задля контролю дорожнього руху в місті.

Етап 3. Впровадження через 4-5 років після впровадження 2-го етапу. Ліквідація підземного переходу, та відновлення наземного пішохідного переходу, з острівцем безпеки, шириною 3 м.

Висновки. В цій статті ми розглянули ключове перехрестя м. Суми, в якому дізналися про нинішній стан: має дуже великі розміри: 96 м між стоп-лініями по вул. Харківській та Покровської площі та 50 м по вулицях Гагаріна і Героїв Сумщини.

Також було виявлено 6 негативних факторів: а) крайня права смуга з Покровської площі має ширину 4 метри, що більше ніж передбачено; б) пішохідний перехід по вул. Героїв Сумщини знаходиться поза радіусом перехрестя та є нерегульованим через що транспорт має постійно зупинятися, щоб пропустити пішоходів; в) помічено найуразливішу групу учасників дорожнього руху – велосипеди; г) водії, які рухаються з вул. Героїв Сумщини на вул. Харківську часто перетинають подвійну суцільну лінію дорожньої розмітки; д) потік, який іде з вул. Героїв Сумщини на вул. Хар-

ківську пропускає потік, який рухається з вул. Гагаріна на вул. Героїв Сумщини; е) ширина смуги між першою стоп-лінією та стоп-лінією на перехресті складає 6 метрів, тоді як ширина смуги руху на вул. Героїв Сумщини складає 3,5 метра, через що частина водіїв робить перестроювання в недозволеному місці.

Окрім дрібних порушень, це перехрестя ще є аварійно-небезпечною ділянкою. За проаналізованими даними з 2018 по 10-й місяць 2021 року було зафіксовано 17 ДТП.

Для покращення показників перехрестя пропонується його привести до вигляду стандартних європейських перехресть. Такий принцип організації дозволяє забезпечити не тільки добру пропускну здатність, а ще і високі показники доступності.

Для цього перехрестя пропонується: звуження ширини смуги руху; каналізування правоповоротних потоків; велосипедні переїзди та велосипедні смуги передбачено з усіх сторін перехрестя та на всіх підходах по вулицях.

Для даного перехрестя було розроблено пофазний роз'їзд задля забезпечення потоків.

Бібліографічні посилання:

1. Biliatynskiy O.A. [Motorway design]. (1997). Kyiv: Vyshcha shkola. (Chastyna 2), 528 (in Ukrainian).
2. Derzhavni budivelni normy Ukrainy (2001). [Transport facilities. Streets and roads of settlements]. DBN V.2.3-5-2001. Kyiv: Derzhbud Ukrainy, 51 (in Ukrainian).
3. Derzhavni budivelni normy Ukrainy (2002). [Urban planning. Planning and construction of urban and rural settlements]. DBN 360-92**. К., 140 (in Ukrainian).
4. Havrylov E. V., Dmytrychenko M. F., Dolia V. K. [Systemology in transport. Organization of traffic]. (2007). Znannia Ukrainy, 452 (in Ukrainian).
5. Lobashov A. O. [About the predicted speed of traffic flows on city streets] (1999). Vistnyk KhHADTU. Kharksv : KhHADTU, 91–93 (in Ukrainian).
6. Osetrin M.M. (1997). [City road and transport facilities]. Navch. posibnyk dlia stud. VNZ/M.M. Osetrin. K.: IZMN, 196 (in Ukrainian).
7. Savenko V.Ia., Huba V.V. [Transport and operational properties of highways]: navch. posibnyk (2011). Donetsk : DVNZ «DonNTU», 229 (in Ukrainian).
8. Shirokun. I. [The exact number of cars in Ukraine and their average age are named]. (2018). Retrieved from: https://auto.24tv.ua/nazvana_tochna_kilkist_avtomobiliv_v_ukraini_ta_yikh_serednii_vik_n6262 (in Ukrainian).
9. Sylianov V.V., Domke E.R.. [Transport and operational quality of roads in city streets] : uchebnyk dlia stud. vsssh. ucheb. zavedenyi (2009). 3-e yzd., ster. M. : Yzdatelskyi tsentr «Akademyia», 352 (in Ukrainian).
10. Vinokurov Ya. [It became known how much Ukrainians spent on importing cars in 2019]. (2020). Retrieved from: <https://hromadske.ua/posts/stalo-vidomo-skilki-ukrayinci-vitratili-na-importni-avto-u-2019-roci> (in Ukrainian).

Solarov O. O., PhD, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Sarzhanov O. A., PhD, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Features of traffic organization at city intersections

The organization of road traffic at complex intersections is very important, since about 80% of traffic accidents occur precisely at such sections of the road. This article examines the intersection of the city of Sumy, which belongs to such accident-prone sections of the road. The intersection of Kharkivska Street, Heroes of Sumshchyna Street, Gagarin Street, and Pokrovska Square is under consideration, which is located in the central part of the city and is an important node at the intersection of the main transport corridors of the city.

Analyzing the situation on this section of the road, we came to the conclusion that the study and analysis of the movement of vehicles at this intersection has an important applied value for the city. A number of factors have been identified at the intersection that contributed to the occurrence of traffic accidents, some of these factors provoke violations of traffic rules, and the constructively created intersection has a rather large load, which leads to complications in the departure of vehicles and the occurrence of traffic accidents. According to the analyzed data, 17 traffic accidents were recorded from 2018 to 2021. The article provides data by year, where it can be seen that the accident rate of the intersection is increasing every year. If we compare 2018 and 2020, the number of accidents has increased 4 times. When comparing 2020 and 10 months of 2021, the accident rate increased 2.5 times. When comparing 2018 and 10 months of 2021, the accident rate increased 10 times. The modern PTV VISSIM software was used during analysis and simulation. In order to simulate the optimized intersection, the phase-by-phase interchange and cyclogram were modified, taking into

account right turns and separately from the movement of straight left turns from the street. Heroes of Sumy Oblast, with high traffic intensity. From Gagarina Street to the left, the flow is up to 30 cars/hour, from Pokrovska Square to the right, the flow is up to 15 cars/hour.

Thus, a step-by-step program for the implementation of measures was developed that would contribute to increasing traffic safety at these intersections. The best solution for the studied intersection is to preserve the traffic light regulation with the regulation of the area of the intersection (between the stop lines) and the creation of a conflict-free phase intersection. A program of implementing changes for the intersection was developed in 3 stages: 1st stage – the main stage, 2nd stage – after 2-3 years after the implementation of the 1st stage, 3rd stage – after 4-5 years after the implementation of the 2nd stage.

Key words: traffic, intersection, organization of traffic, traffic flow.

НОВИЙ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЬНИХ КІЛЕЦЬ ІМПУЛЬСНИХ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ, ЯКІ ПІДЛЯГАЮТЬ РАДІАЦІЙНОМУ ОПРОМІНЮВАННЮ

Тарельник В'ячеслав Борисович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0003-2005-5861
tarelnik@i.ua

Гапонова Оксана Петрівна

доктор технічних наук, професор
Сумський державний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-4866-0599
gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Власовець Віталій Михайлович

доктор технічних наук, професор
Львівський національний університет природокористування, м. Львів, Україна
ORCID: 0000-0002-6657-6761
vlasovez@ukr.net

Тарельник Наталія В'ячеславівна

кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-6304-6925
natasha-tarelnik@ukr.net

Зубко Владислав Миколайович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-2426-2772
zubkovladislav@ukr.net

Шуляк Михайло Леонідович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0001-7286-6602
m.l.shulyak@gmail.com

Кирик Григорій Васильович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-8620-4842
ptmz0503071305@gmail.com

В статті проведений аналіз існуючих на теперішній час літературних та патентних джерел, направлених на покращення параметрів якості поверхневих шарів деталей пар тертя. Метою роботи визначено підвищення якості та зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень, які можна використовувати в умовах радіаційного опромінювання, шляхом формування на робочих поверхнях кілець методом електроіскрового легування квазібагатошарових покриттів, що об'єднують в собі змащувальні та механічні властивості.

Авторами запропонований новий спосіб підвищення якості поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень, які працюють в умовах радіаційного опромінювання. Дослідження застосування нового способу проводили для сталей марок 12X18H10T, 30X13 і 40X. Спосіб полягає в нанесенні методом електроіскрового легування на поверхню кільця торцевого імпульсного ущільнення покриття з міді при енергії розряду $W_p = 0,04$ Дж, а потім, на сформовану поверхню, наносять спеціальне технологічне насичуюче середовище у вигляді пастоподібної суміші, до складу якої входять – 80% карбїду вольфраму, 10% нікелю і 10% вазелїну, і проводять електроіскрове легування графітовим електродом при енергії розряду в межах $W_p = 0,5-4,6$ Дж. Легування міддю та графітовим електродом-інструментом відбувалось на установці з ручним вібратором «Елітрон-22А». З експериментальних зразків виготов-

лялися шліфи, які досліджували на оптичному мікроскопі «Неофот-2». За допомогою мікроскопа проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини і будови зон підшару – дифузійної зони і зони термічного впливу. Також проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі і по глибині шліфа від поверхні.

Застосування нового способу, дозволяє, формувати шари робочих поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень підвищеної твердості товщиною залежно від марки сталі й енергії розряду при цементації методом електроіскрового легування від 30 до 115 мкм, мікротвердістю до 10350 МПа і суцільністю 100%. Шорсткість сформованого покриття знаходиться в межах $Ra = 0,7-14,2$ мкм. Подальше зниження шорсткості можливо за рахунок подальшої цементації методом електроіскрового легування, але з меншою енергією розряду, а також безабразивної ультразвукової фінішної обробки.

Ключові слова: електроіскрове легування, торцеве імпульсне ущільнення, твердість, шорсткість, покриття, електрод, матеріал, поверхня.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.12>

Вступ. Більшість відповідальних деталей вузлів тертя високошвидкісних турбонасосних та турбокомпресорних агрегатів (ТКА) компресорів, насосів і іншого динамічного обладнання, працює при високих швидкостях, тисках, температурах, а також в умовах абразивного, корозійного й іншого видів впливу робітничих середовищ. Підвищення режимних параметрів турбонасосних та ТКА ракет-носіїв, потужність яких при мінімальних габаритах перевищує сотню мегават, супроводжується появою нових, композиційних матеріалів, типу «основа – покриття», що сполучають у собі захисні властивості покриттів з механічною міцністю основи. Перспективним напрямком створення цих матеріалів можуть бути нові екологічно чисті, енергоефективні методи (алітування, цементація, нітроцементація, силіціювання та ін.), створені на базі методу електроіскрового легування (ЕІЛ). Формування поверхневих шарів деталей вище означеними методами, та їх комбінаціями, дозволяють підвищити зносостійкість вузлів тертя більш економічними методами.

Досвід експлуатації ТКА показує, що дві третини всіх відмов устаткування відбуваються внаслідок порушення працездатності ущільнень. Останнім часом до ущільнень пред'являються підвищені вимоги відносно герметичності, довговічності, здатності працювати при високих значеннях технологічних параметрів. Створення надійних ущільнювальних вузлів, що забезпечують герметичність протягом тривалого часу в широкому діапазоні зміни температур і тисків, є однією з основних проблем, що виникають при проектуванні машин і агрегатів.

Постановка проблеми. Згідно з (Blasiak S., 2016) торцеве ущільнення (ТУ) є герметизувальним пристроєм, що складається з двох деталей у вигляді кілець: одне з яких обертається разом із валом, а інше нерухоме, пов'язане з корпусом. Кільця постійно стиснені й утворюють плоску пару тертя. Стиснення ущільнювальних поверхонь кілець забезпечується пружинами, сильфонами, надлишковим тиском мастильної рідини. Стисканню робочих поверхонь протидіє робочий тиск ущільнювального середовища p . Для запобігання витoku ущільнювального середовища через зазор пари тертя необхідно, щоб стискувальне зусилля було більшим за сили, які розкривають зазор, обумовлені робочим тиском.

Кільця ТУ являють собою пару тертя, що відіграє роль основного ущільнювального елемента, тому їх виготовляють із спеціальних матеріалів, які вибирають залежно від умов експлуатації. Правильно вибраний матеріал кілець ТУ забезпечує надійну, безпечну та безвідмовну роботу вузла ущільнення, а отже, й усього агрегату. Зазвичай

одне з кілець торцевої пари виконують із графіту, інше – з графіту, металу або кераміки (Tarelnyk V.B., 2022).

Наявність в торцевій парі ТІУ гарантованого зазору величиною 0,003–0,004 мм призводить до того, що ущільнювальні поверхні кілець майже не зношуються. Незважаючи на це, їх ущільнювальні кільця повністю виготовляються зі зносостійких матеріалів, таких як карбід вольфраму, карбід кремнію, різні види графіту. Вартість кілець із цих матеріалів досягає сотень і тисяч доларів США, що обумовлює високу вартість ущільнювальних вузлів у цілому.

Торцеві імпульсні ущільнення (ТІУ) широко використовують у високооборотних насосах і компресорах великого тиску. Робочі торцеві поверхні ТІУ контактують нетривалий час, лише в моменти пуску і зупинення машини (Zahorulko A., 2015).

Зазвичай ТІУ містять аксіально-рухоме металеве кільце, встановлене в корпусі, що забезпечене вторинним ущільненням, яке герметизує порожнину з різним тиском, опорне металеве кільце, закріплене на валу. На робочій торцевій поверхні аксіально-рухомого кільця розміщені замкнені камери, а на торцевій поверхні опорного кільця – підвідні канали, які під час обертання опорного кільця послідовно з'єднують замкнені камери з ущільнювальною порожниною.

Форма підвідних каналів може бути різною, наприклад у вигляді радіальних живильників (Tarelnyk V.B., 2022), тангенціальних живильників (Tarelnyk V.B., 2022), комбінованих живильників – радіальні та осьові канали (Tarelnyk V.B., 2022).

Конструктивно розрізняють ТІУ з гумовим вторинним ущільненням (Tarelnyk V.B., 2022) і вторинним ущільненням, виготовленим у вигляді металевої манжети (Tarelnyk V.B., 2022).

ТУ з імпульсним зрівноваженням аксіально-рухомого елемента має порівняно недавно історію – 1974 р. (Tarelnyk V.B., 2022). Традиційна конструктивна схема ТІУ показана на рис. 1. На робочій поверхні аксіально-рухомого кільця 1 розміщені замкнені камери 2, а на поверхні опорного диска 3 передбачено кілька підвідних каналів 4, які під час обертання опорного кільця послідовно з'єднують камери 2 з ущільнювальною порожниною А.

Принцип дії імпульсного ущільнення ґрунтується на тому, що під час обертання ротора підвідні канали 4 періодично сполучають камери з порожниною високого тиску 5, внаслідок цього в них відбуваються сплески тиску (імпульси), що спричиняють зміну балансу осьових сил.

ТІУ належать до типу саморегульованих, у них величина торцевого зазору витримується автоматично.

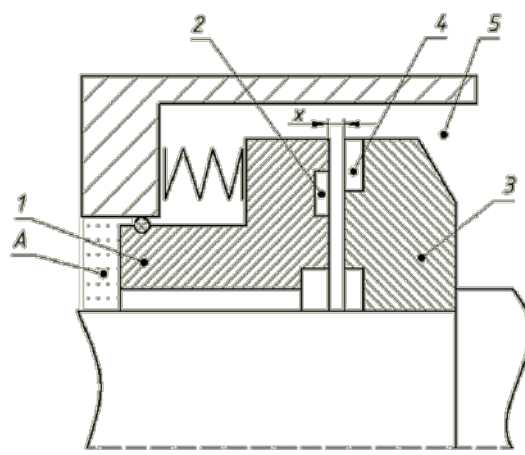


Рис. 1. Конструктивна схема ТЛУ

ТЛУ на рідинному мастилі досліджені в широкому діапазоні параметрів режиму: ущільнювальний перепад тисків до 16,0 МПа, швидкість ковзання до 100 м/с. Завдяки своїм високим експлуатаційним якостям, вони успішно працюють у високооборотних живильних насосах атомних і теплових електростанцій. У середньому їх напрацювання між плановими ремонтами насосів становить не менше ніж 8 000 год, водночас ступінь зношення при шляху 10^6 км залишається в межах 1–2 мкм, що для вузлів тертя характеризується як нульове зношення. За типових умов роботи (тиск – 2,0–4,0 МПа, колова швидкість – 40–60 м/с) рівень витoku становить усього 1–2 л/год (Tarel'nyk V.B., 2022).

У (Tarel'nyk V.B., 2022) проведено аналіз роботи затворного імпульсного ущільнення. Відзначено, що застосування таких ущільнень дозволяє заощадити енергію й ресурси, а також підвищити екологічну безпеку насосного та компресорного обладнання.

У деяких агресивних середовищах, де застосування в різних з'єднаннях ущільнень із неметалевих матеріалів обмежене або неможливе, використовують металеві ущільнення.

До останнього часу вважалось, що ТЛУ працює лише в рідких середовищах. Однак проведені теоретичні та експериментальні дослідження засвідчили, що ці ущільнення працюють і в рідинах, і в газах. Були виконані унікальні дослідження імпульсних ущільнень за надвисоких режимних параметрів $p_v > 400$ МПа · м/с в криогенній рідині (рідкий азот, $t = -195$ °С), які показали, що таке ущільнення малочутливе до теплофізичних властивостей і температури робочого середовища. Усе це дозволяє зробити висновок про універсальність ТЛУ і велику практичну цінність (Tarel'nyk V.B., 2022).

З огляду на те, що при використанні високих і надвисоких тисків, екстремальних температур (від високих до криогенних), агресивних середовищ та ін., де застосування в різних з'єднаннях ущільнень із неметалевих матеріалів обмежене або неможливе, стає доцільним застосування металевих ущільнень, для яких практично немає обмежень, крім міцності самого матеріалу ущільнень і термостійкості матеріалу покриття

(Tarel'nik V.B., 2017, P.1; Tarel'nik V.B., 2017, P.2; Tarel'nik V.B., 2017, P.3).

Необхідно зазначити, що ущільнення, які мають гумові ущільнювачі вторинного ущільнення, не працюють в криогенних середовищах.

Згідно з (Tarel'nyk V.B., 2022) ущільнення роторів повинні задовольняти дві головні умови: мати необхідну герметичність і підвищену надійність за заданих перепадів тиску, частот обертання, температур і фізичних властивостей ущільнювального середовища. Зазвичай ТУ працюють у режимі граничного або напіврідинного змащування і на розрахункових режимах забезпечують мінімальне, краплинне витікання. Внаслідок цього зазор між кільцями повинен бути дуже маленьким, змащувальна плівка дуже тонкою, а матеріали поверхні ущільнення витримувати тертя один об одного, причому часто за високих швидкостей і навантажень. Тому матеріали для поверхонь ТУ повинні мати низький коефіцієнт тертя, достатню твердість, хорошу стійкість до корозії й високу теплопровідність. Допустима неплоскостність контактних поверхонь – не більше ніж 0,6 мкм.

Перспективним шляхом підвищення зносостійкості кілець ТЛУ можуть бути комбіновані методи текстурування поверхонь кілець методом ЕІЛ та лазерним обробленням (Antoszewski B., 2014), а також формування на робочих торцевих поверхнях квазібагатошарових покриттів, що поєднують у собі тверді зносостійкі й м'які антифрикційні матеріали (Tarel'nyk V.B., 2012).

За способом електроерозійного легування (ЕЕЛ), те саме, що і ЕІЛ (Tarel'nyk V.B., 2022) з метою підвищення зносостійкості і зменшення шорсткості поверхні, спочатку наносять шар покриття антифрикційним легкоплавким металом, обраним з групи In, Cd, Sn, Pb, а потім шар покриття із зносостійкого високотвердого металу, вибраного з групи Ti, V, W та їх карбідів. При цьому різко знижується шорсткість поверхні до $Ra = 0,54-0,91$ мкм. Одночасно підвищується зносостійкість. Проте досвід показав, що, незважаючи на підвищення зносостійкості, мікротвердість таких покриттів недостатньо висока. Тому було запропоновано спосіб ЕІЛ, в якому спочатку наносили шар покриття антифрикційним металом міддю, а потім шар із зносостійкого

високотвердого металу або його карбїду, обраного з групи Ti, V, W. Металографічні дослідження шарів ЕІЛ покриттів, сформованих за вказаним способом на сталі 45, свідчать про те, що їх мікротвердість знаходиться на порівняно високому рівні (8400–12300 МПа). Причому, на покритті присутня плівка міді товщиною 1–3 мкм. Усі покриття, сформовані таким способом, мають характерний жовтий колір. Наявність міді як на поверхні, так і по всій товщині покриття підтверджується рентгеноструктурним аналізом (Tareluk V.B., 2022). Однак, слід зазначити, що товщина таких покриттів невелика і складає 15–20 мкм, а суцільність – менше 100%.

Найбільш близьким до способу, що пропонується в дійсній роботі, є спосіб (прототип) в якому для збільшення товщини і суцільності покриття запропоновані квазібагат шарові електроіскрові покриття, що формуються в послідовності ВК8+Cu+ВК8. За цим способом перший і останній шари з твердого сплаву ВК8 наносять при енергії розряду $W_p = 0,2$ Дж, а мідь – при $W_p = 0,08$ Дж. У цьому випадку товщина зміцненого шару збільшується до 30–40 мкм, мікротвердість знаходиться на рівні 8740 МПа, а суцільність становить 100% (Tareluk V.B., 2022).

Незважаючи на низку позитивних особливостей квазібагат шарових електроіскрових покриттів, складу ВК8+Cu+ВК8, відмічених у прототипі, слід відмітити, що твердий сплав ВК8 має в своєму складі 8% кобальту, наявність якого, не дозволяє використовувати їх для ТІУ, що працюють в умовах радіаційного опромінювання. Порівняно з енергетичними установками на органічному паливі, умови роботи матеріалів в атомних енергетичних установках звичайно є більш складними й багатфакторними. При виборі конструкційних матеріалів для ядерних енергетичних установок (ЯЕУ) різних типів необхідно брати до уваги серед інших основних умов: число й величину циклічних змін механічних навантажень; нейтронне опромінення й вплив теплоносія на корозію й корозійно-механічну міцність матеріалів. Для зниження впливу перенесених активних продуктів корозії на умови ремонту встаткування першого контуру в ряді випадків у сталі регламентується вміст елементів, які при опроміненні стають джерелом небезпечних довгоживучих ізотопів. Насамперед, це стосується кобальту. Також відомо, що кобальт, який має великий період напіврозпаду, неприпустимо використовувати в ущільненнях насосів атомних електростанцій (Наронова О. Р., 2022; Yefimov O. V., 2017).

Крім цього, кобальт має низьку хімічну стійкість, він розчиняється навіть у дистильованій воді, тому його не можна застосовувати в апаратах харчової промисловості. Кобальтове зв'язування кілець з карбїдів вольфраму піддається сильній корозії в морській воді (Tareluk V.B., 2022; Tareluk N. V., 2022). Причому, наявність у покритті навіть незначної кількості (до 8%) кобальту за певних умов може негативно позначитися на його зносостійкості.

Використання нікелю вирішує явища, які відбуваються при використанні кобальтової зв'язки (Tareluk V.B., 2022; Tareluk N. V., 2021). Хімічний склад матеріалів деталей, що стикаються з теплоносієм, не містить спеціальних добавок кобальту та інших елементів, що

утворюють довгоживучі ізотопи в активному робочому середовищі. Тому в якості матеріалу покриттів можна використати метали, які не утворюють довгоживучі ізотопи в активному робочому середовищі, наприклад, хром, молібден, нікель та ін.

Таким чином, **метою роботи** є підвищення якості та зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень, які можна використовувати в умовах радіаційного опромінювання, шляхом формування на робочих поверхнях кілець методом ЕІЛ квазібагат шарових покриттів, що об'єднують в собі змащувальні та механічні властивості.

Методи досліджень

Для досягнення поставленої мети першим шаром на поверхню кільця ТІУ наносять мідь при енергії розряду $W_p = 0,04$ Дж, а потім, на сформоване покриття з міді, наносять спеціальне технологічне насичувальне середовище (СТНС) у вигляді пастоподібної суміші, до складу якої входять – 80% карбїду вольфраму, 10% нікелю і 10% вазеліну, і проводять електроіскрове легування графітовим електродом при енергії розряду в межах $W_p = 0,5–4,6$ Дж.

Слід відмітити, що при ЕІЛ графітовим електродом протікає безліч дискретних процесів насичення оброблюваної поверхні вуглецем, які співпадають з загартуванням поверхневого шару. Таким чином відбувається процес цементації методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ).

З метою зменшення шорсткості поверхні після ЦЕІЛ рекомендовано проводити подальшу обробку поверхні графітовим електродом при енергії розряду в межах $W_p = 0,06–2,6$ Дж для надання необхідної шорсткості. В подальшому робочі поверхні, які підлягають ЕІЛ, піддаються безабразивній ультразвуковій фінішній обробці (БУФО).

Дослідження застосування нового способу проводили для різних матеріалів сталі: 12Х18Н10Т, 30Х13 і 40Х.

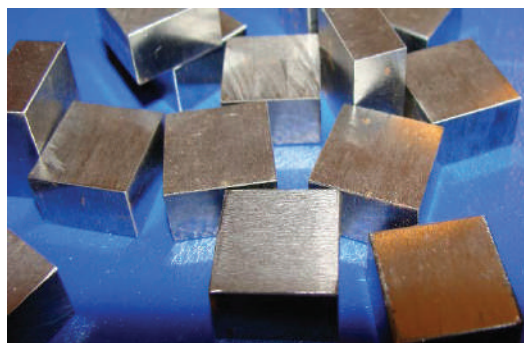
Для дослідження структури і виміру твердості поверхневого шару використовували шліфи зразків розміром 10×10×8 мм. Легування міддю та графітовим електродом-інструментом відбувалось на установці з ручним вібратором «Елітрон-22А» (рис. 2).

Для виготовлення спеціального технологічного насичувального середовища у вигляді пастоподібної суміші, використовували 80% порошку карбїду вольфраму (розмір часток 4–6 мкм) марки WC, який складається, згідно ТУ48-19-540-92 з 94% W і 6% C; 10% порошку нікелю карбонільного, марки ПНК (ГОСТ 9722-97), в склад якого входить 99,7–99,9% нікелю, з розміром часток < 20 мкм і 10% вазеліну.

Поверхня шліфа була орієнтована перпендикулярно до поверхні легування. Перед виготовленням шліфа для виключення крайового ефекту при легуванні торець зразка фрезерували на глибину не менше 2 мм. Для попередження зминання шару, завалів краю зразок кріпили за контртіло в струбціні. Далі шліф піддавався хімічному травленню для виявлення структури в реактиві. Після виготовлення шліфи досліджували на оптич-



а



б

Рис. 2. Зображення установки електроерозійного легування моделі «Елітрон–22А» (а) та зразки для досліджень (б)

ному мікроскопі «Неофот-2», за допомогою якого проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини і будови зон підшару – дифузійної зони і зони термічного впливу. Також проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі і по глибині шліфа від поверхні. Замір мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавненням алмазної піраміди під навантаженням 0,05 Н. Шорсткість вимірювали на приладі профілографі-профілометра мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття та обробки профілограм.

Результати дослідження. На рис. 4 зображені мікроструктури (а, в) і розподіл мікротвердості за товщиною шару (б, г), відповідно зразків сталі 12Х18Н10Т і 40Х після ЦЕІЛ, які були отримані при енергії розряду 2,6 Дж. Проведений металографічний аналіз показав, що мікроструктури складаються з 3-х зон: верхній «білий» шар, що не травиться у реактиві, дифузійна зона і основа. Найбільша мікротвердість знаходиться ближче до поверхні зразків, яка по мірі поглиблення повільно зменшується до мікротвердості основи. Глибина зміцненого шару, найбільша мікротвердість і шорсткість поверхні відображені в табл. 1.

В зведеній табл. 1 представлені результати проведених досліджень сталевих зразків після ЕІЛ міддю і ЦЕІЛ при різних енергіях розряду.

Аналіз таблиці 1 показав, що незалежно від досліджуваного матеріалу, шорсткість поверхні зростає з підвищенням енергії розряду. Крім того, для всіх мате-

ріалів сталей, зі збільшенням енергії розряду збільшується загальна глибина зміцненого шару і максимальна мікротвердість на поверхні досліджуваних зразків. Мікротвердість зміцненого шару зростає до енергії розряду $W_p = 4,6$ Дж, а потім знижується. Незалежно від досліджуваного матеріалу і режиму ЦЕІЛ мікротвердість зміцненого шару, від максимальної на поверхні, у міру поглиблення плавно знижується і переходить в мікротвердість основи. Суцільність зміцненого шару на усіх досліджуваних зразках становить 100%.

Враховуючи те, що ЦЕІЛ при енергії розряду $W_p = 6,8$ Дж, супроводжується зниженням мікротвердості і значним підвищенням шорсткості поверхневого шару, до практичної реалізації запропонованого способу рекомендуються параметри W_p в межах 0,5–4,6 Дж.

В попередніх роботах нами відмічалось, що шорсткість поверхневого шару можна знизити за рахунок подальшої ЦЕІЛ, але з меншою енергією розряду (Martsynkovskiy V.S., 2013), а також БУФО (Tarelnyk V.B., 2006). Результати шорсткості поверхні сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІЛ з меншою енергією розряду і БУФО представлені в табл. 2.

Висновки:

1. Запропонований новий спосіб підвищення якості поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень, які працюють в умовах радіаційного опромінювання. Спосіб полягає в нанесенні методом ЕІЛ на поверхню кільця ТІУ покриття з міді при енергії розряду

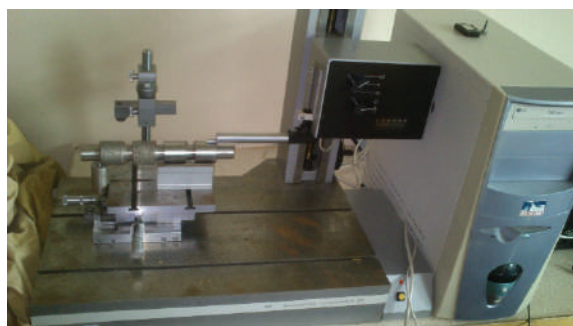
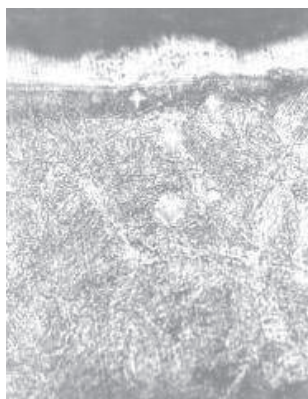
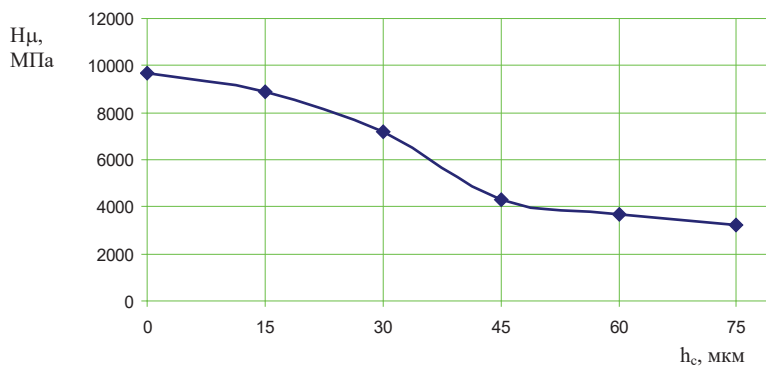


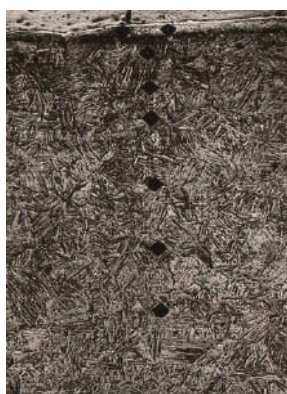
Рис. 3. Зображення профілографі-профілометра мод. 201 заводу «Калібр»



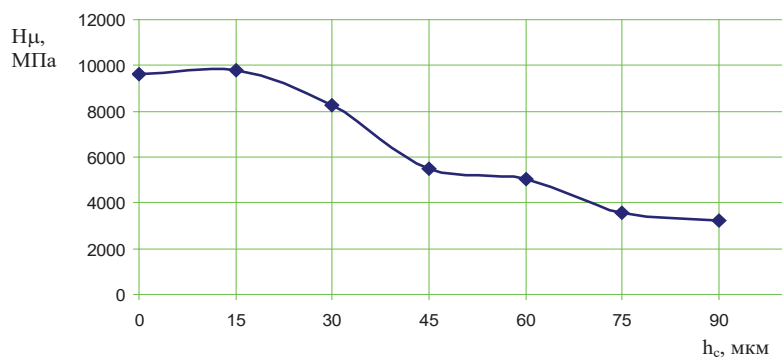
а



б



в



г

Рис. 4. Мікроструктура (а, в) і розподіл мікротвердості за товщиною шару (б, г), відповідно зразків сталі 12X18H10T і 40X після ЦЕІЛ з $W_p = 2,6$ Дж

Таблиця 1

Параметри якості поверхневих шарів зразків сталі 12X18H10T

Енергія розряду W_p , Дж	Продуктивність, $см^2/хв$	Загальна глибина шару, мкм	Мікротвердість, МПа	Шорсткість, R_a , мкм
Сталь 12X18H10T				
0,5	1,0-1,3	30	9020	0,8-0,9
1,3	1,3-1,5	45	9320	1,0-1,8
2,6	1,5-2,0	60	9740	5,1-6,7
4,6	2,0-2,5	70	9860	8,3-9,0
6,8	2,5-3,0	110	8590	11,0-14,2
Сталь 30X13				
0,52	1,0-1,3	40	9510	0,7-0,9
1,3	1,3-1,5	55	9630	1,1-1,7
2,6	1,5-2,0	70	9840	5,8-6,3
4,6	2,0-2,5	80	10350	8,0-8,5
6,8	2,5-3,0	115	9270	11,9-14,0
Сталь 40X				
0,52	1,0-1,3	35	9430	0,7-1,1
1,3	1,3-1,5	50	9590	1,2-2,3
2,6	1,5-2,0	65	9830	5,5-6,8
4,6	2,0-2,5	75	10150	8,3-9,1
6,8	2,5-3,0	110	8900	11,5-13,9

Параметри шорсткості зразків сталі 12X18H10T при подальшій ЦЕІЛ з меншою енергією розряду і БУФО

Енергія розряду Wp, Дж	Шорсткість, Ra, мкм	Зменшена енергія розряду Wp, Дж	Продуктивність, см ² /хв	Шорсткість, Ra, мкм	Шорсткість, Ra, мкм після обробки БУФО
0,5	0,8-0,9	0,06	0,5-0,8	0,6-0,7	0,3-0,4
1,3	1,0-1,8	0,5	1,0-1,3	0,8-0,9	0,4-0,5
2,6	5,1-6,7	1,3	1,3-1,5	1,2-1,4	0,6-0,7
4,6	8,3-9,0	2,6	1,5-2,0	5,2-6,8	1,0-1,2

Wp = 0,04 Дж, а потім, на сформовану поверхню, наносять СТНС у вигляді пастоподібної суміші, до складу якої входять – 80% карбиду вольфраму, 10% нікелю і 10% вазеліну, і проводять електроіскрове легування графітовим електродом при енергії розряду в межах Wp = 0,5–4,6 Дж.

2. Застосування нового способу, дозволяє, формувати шари робочих поверхонь сталевих кілець торцевих

імпульсних ущільнень підвищеної твердості товщиною залежно від марки сталі й енергії розряду при ЦЕІЛ від 30 до 115 мкм, мікротвердістю до 10350 МПа і суцільністю 100%. Шорсткість сформованого покриття знаходиться в межах Ra = 0,7–14,2 мкм.

3. Шорсткість поверхневого шару можна знизити за рахунок подальшої ЦЕІЛ, але з меншою енергією розряду, а також БУФО до 0.3–0,4 мкм при Wp = 0,5 Дж.

Бібліографічні посилання:

1. Antoszewski B., Tarelnik V. (2014) Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 630. P. 301-307.
2. Yefimov O. V., Pylypenko M. M., Potanina T. V. та ін. (2017). Реакторы і парогенераторы енергоблоков AES: skhemy, protsesy, materialy, konstruksii, modeli [Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, designs, models] / za red. O.V. Yefimova. – Kharkiv : TOV «V spravi», 2017. – 420 s.
3. Blasiak, S., Zahorulko, A.V. (2016) A parametric and dynamic analysis of non-contacting gas face seals with modified surfaces. *Tribology International*. Vol. 94. P. 126-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.014>
4. Haponova O. P., Martsynkovskiy V. S., Tarelnyk N. V., Zubko V. M., & Dumanchuk M. Yu. (2022). A new method of assembling sliding bearings for centrifugal pumps operating in radiation exposure. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (1(52)), 7–14. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-7-14](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-7-14)
5. Tarelnyk V.B, Konoplianchenko Ye.V., Haponova O.P, & Tarelnyk N.V. (2022). Zabezpechennia zakhystu poverkhon tortsevykh impulsnykh ushchilnen turbomashyn shliakhom formuvannia znosostiikykh nanostruktur: monohrafiia [Ensuring the protection of the surfaces of end pulse seals of turbomachines by forming wear-resistant nanostructures: monograph] / za zah. red. V.B. Tarelnyk. Sumy: Universytetska knyha (in Ukrainian).
6. Martsynkovskiy V.S., Tarelnyk V.B., Bratushchak M.P. (2013) Patent Ukrainy na vynakhid № 101715, 23N 9/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroeroziinym lehuванням [The method of cementation of steel parts by electro-erosion alloying] / Opubl. 25.01.2013, biul. № 8 (in Ukrainian).
7. Martsynkovskyy V., Zahorulko A. , Gudkov S., Mischenko S. (2012) Analysis of buffer impulse seal. *Procedia Engineering*. Vol. 39. P. 43-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.006>
8. Tarelnik, V.B., Martsinkovskii, V.S. & Zhukov, A.N. (2017) Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. *Chem Petrol Eng* **53**, 114–120. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>
9. Tarelnik, V.B., Martsinkovskii, V.S. & Zhukov, A.N. (2017) Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 2*. *Chem Petrol Eng* **53**, 266–272
10. Tarelnik, V.B., Martsinkovskii, V.S. & Zhukov, A.N. (2017) Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3*. *Chem Petrol Eng* **53**, 385–389. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0351-5>
11. Tarelnyk N. V. (2021). A new method for restoring worn surfaces of steel parts of pumping equipment, nuclear power plants. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (2(51)), 32–39. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-32-39](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-32-39).
12. Tarelnyk N.V. (2022) Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in Conditions of Radiation Exposure Retailed by Electrospark Alloying. I. Features of Topography and Mechanical Properties of Coatings, *Metalloriz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 8: 1037–1058 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mfint.44.08.1037
13. Tarelnyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Antoshevskiy B. (2006) Pidvyshchennia yakosti pidshypnykiv kovzannia [Improving the quality of sliding bearings] Vydavnytstvo «MakDen», Sumy, 160 (in Ukrainian).
14. Tarelnyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Antoshevskiy B. (2012) Suchasni metody formoutvorennia poverkhon tertia detalei mashyn: monohrafiia [Modern methods of forming friction surfaces of machine parts: monograph]. Vydavnytstvo «MakDen», Sumy, 280 p. (in Ukrainian).
15. Zahorulko A. (2015) Theoretical and experimental investigations of face buffer impulse seals with discrete supplying. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4, No 7(76). P. 45-52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.48298>

Tarelnyk V. B., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Gaponova O. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Vlasovets V. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv National University of Nature Management, Lviv, Ukraine

Tarelnyk N. V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Zubko V. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Shulyak M. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Kyryk H. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

A new method of improving the surface quality of steel rings of impulse end seals subjected to radiation irradiation

The article analyzes the currently existing literature and patent sources aimed at improving the quality parameters of the surface layers of friction pair parts. The purpose of the work is to improve the quality and wear resistance of the working surfaces of steel rings of end pulse seals, which can be used in conditions of radiation exposure, by forming quasi-multilayer coatings combining lubricating and mechanical properties on the working surfaces of the rings by the method of electrospark alloying.

The authors proposed a new way of improving the quality of the surfaces of steel rings of end pulse seals that work under conditions of radiation exposure. Research on the application of the new method was carried out for steel grades 12X18N10T, 30X13 and 40X. The method consists in applying a copper coating to the surface of the end pulse sealing ring by the method of electrospark alloying at a discharge energy $W_p = 0.04$ J, and then, on the formed surface, a special technological saturating medium is applied in the form of a paste-like mixture, the composition of which includes – 80% tungsten carbide, 10% nickel and 10% petroleum jelly, and carry out electrospark alloying with a graphite electrode at a discharge energy in the range of $W_p = 0.5–4.6$ J. Alloying with copper and a graphite electrode-tool was carried out on an installation with a manual vibrator "Elytron-22A". Grits were made from the experimental samples, which were examined on the optical microscope "Neofot-2". With the help of a microscope, the quality of the layer, its integrity, thickness and structure of the sublayer zones – the diffusion zone and the zone of thermal influence – were assessed. A durometric analysis was also carried out on the distribution of microhardness in the surface layer and along the depth of the cut from the surface.

The application of the new method allows forming layers of the working surfaces of steel rings of end pulse seals of increased hardness with a thickness depending on the grade of steel and the energy of the discharge during cementation by the method of electrospark alloying from 30 to 115 microns, with a microhardness of up to 10350 MPa and 100% integrity. The roughness of the formed coating is within $R_a = 0.7–14.2$ microns. Further reduction of roughness is possible due to further cementation by electrospark alloying, but with lower discharge energy, as well as non-abrasive ultrasonic finishing.

Key words: electrospark alloying, end pulse sealing, hardness, roughness, coating, electrode, material, surface.

СУЧАСНІ СИСТЕМИ ПРОВЕДЕННЯ ІНОКУЛЯЦІЇ ПОСІВНОГО МАТЕРІАЛУ ПРОСАПНИХ КУЛЬТУР

Шелест Микола Сергійович

здобувач вищої освіти доктора філософії
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0001-5722-8944
koladj1992@gmail.com

Інокуляція посівного матеріалу доволі часто вивчається вченими з точки зору впливу процесу на розвиток культури. Однак, існує дуже мало інформації щодо забезпечення самої технологічної операції вологої інокуляції насіння. Водночас, процес інокуляції забезпечується в основному застарілими засобами механізації. Хоч інокуляція доволі часто застосовується в Україні при вирощуванні бобових культур, процес обробки насіння інокулянтами досі не був оптимізований. Найчастіше для проведення технологічної операції використовують агрегати для протруювання насіння, це потребує не лише великих енергозатрат, а й залучення великої кількості працівників. Тому, метою цього дослідження було вивчити агромашини, що здатні проводити інокуляцію саме під час сівби культури для забезпечення дотримання агронома і підвищення енергоефективності агропідприємств. В аналізі літературних джерел було визначено і проаналізовано три системи, що теоретично могли б задовольнити вимоги, які ставляться перед операторами водіння і агрономами при проведенні інокуляції. Серед них системи, що відкривають борозну диском або ж лапою культиватором та системи-інжектори. Для кожної з них виявлено переваги і недоліки їх експлуатації в якості системи для інокуляції. Найбільш підходящими для проведення інокуляції засобами, що можуть задовольнити потреби агровиробників, було визначено спеціальний аплікатор StandMax Hunter CS та системи розпилення від ТМ Raven, які встановлюють на посівні комплекси та використовуються закордонними агровиробниками. Також, в статті висвітлено особливості систем та компонентів, що в них використовуються. Серед них типи форсунок, які можуть використовуватись у системах інокуляції; сенсори для контролю вливу рідини; невід'ємними компонентами є також мікропроцесори та програмне забезпечення. Однак, під час пошуку та аналізу літературних джерел не було знайдено методики та рекомендацій щодо внесення інокулянтів в ґрунт під час сівби, тому ця тема потребує подальшого більш детального дослідження.

Ключові слова: зерно, посів, сівалка, висівальний апарат, якість.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.13>

Вступ. В останні роки людство все більше замислюється про технології, що допоможуть зберегти планету. Для цього світовими лідерами було визначено «Глобальні цілі», що сприяють цьому. Найбільш важливими для життя людини є цілі «збереження екосистем суші» і «подолання голоду», адже це два основних питання завдяки яким люди існують. Одним із можливих вирішень цих двох проблем є перехід людства на органічний спосіб вирощування аграрних культур, тобто використання лише органічних добрив, або ж мікроорганізмів як засіб для підвищення врожайності та запобігання деградації ґрунту (He et al., 2022; Qiao et al., 2022; Moskeviciene et al., 2022).

Інокуляція – важливий елемент технології вирощування бобових (Kutawat et al., 2022; Ibrahim & El-Sawah, 2022; Mehboob et al., 2022; Danylchenko & Zhatova, 2016; Danylchenko et al., 2018; Berdin et al., 2013) та інших сільськогосподарських культур (Kusale et al., 2021; Adeleke et al., 2021; Datsko, 2021), що є одним із засобів, який дозволяє підвищити врожайність завдяки інтродукції корисних мікроорганізмів і водночас є цілковито безпечним для навколишнього середовища. Існує декілька способів інокуляції посівного матеріалу, залежать вони від власне самого препарату і його форми. Наразі ми беремо до уваги саме вологий метод інокуляції, тобто з додаванням до нього незначної кількості води при обробці насіння (Ovcharuk et al., 2020). В більшості аграрних підприємств України досі використовують технологічно застарілі

та енергозатратні засоби для проведення цієї операції, а саме протруювачі насіння (Tkachuk, 2014; Kotenko & Ratushnyi, 2017), або ж обробка буртів ручним оприскуванням з подальшим ручним перемішуванням чи взагалі перемішування посівного матеріалу і інокулянта у бетонозмішувачі. Така технологія заселення корисних мікроорганізмів на поверхню насіння створює доволі багато проблем та незручностей, а головне не задовольняє агрономи.

Однією із головних вимог будь-якої культури при посіві є кількість вологи у ґрунті, що зможе забезпечити проростання насіння. Для кукурудзи, наприклад, цей показник становить 30% вологості ґрунту (Zubko et al., 2021), при цьому, його температура не повинна бути нижчою за 10–12°C (Grabovskiy, 2018). Водночас, для мікроорганізмів, що містяться в інокулянтах температура також відіграє важливу роль і повинна бути в межах 10–30°C (Welter, 2019). Наразі, досліджуються нові варіанти інокуляції насіння, тобто безпосередньо в борозні (Schiffmann & Alper, 1968; Rezende et al., 2016; Oliveira et al., 2019).

Тому, **метою** цього дослідження є опис систем, що теоретично здатні проводити інокуляції культур при посіві, а також виявлення їх переваг і недоліків.

Результати. На сьогодні, для проведення інокуляції в польових умовах і безпосередньо під час сівби не визначено чіткої процедури чи спеціального агрегату. Однак, деякі вчені вже пропонували механізм вирішення цієї задачі (Manea et al., 2009; Dražić, 2017; Sahu et al.,

2018). А в дослідженнях (da Rosa et al., 2020, Jordan et al., 2018, Tubbs et al., 2015 та Denton et al., 2017) були порівняні способи якими проводять інокуляцію та їх вплив на культури. Переважно, як науковці так і компанії, що пропонують агрегатувати посівний комплекс обладнанням для інокуляції, бачать вирішення цього питання за рахунок систем, що здатні вносити рідкі мінеральні добрива у ґрунт (Sundaram et al., 2019; Trimurtulu et al., 2014; Kalnahuz et al., 2021; Pierson et al., 2018). Теоретично, дані судження є вірними. Тому, необхідно проаналізувати наскільки дані системи підходять для обробки посівного матеріалу інокулянтами.

Серед всіх існуючих типів внесення рідких мінеральних добрив необхідно виділи ті, що могли б підійти для проведення інокуляції (Palgrave, 2020; Kyuregya et al., 2018; Semernia & Kalnahuz, 2016):

1. Системи, що відкривають борозну диском і дозволяють вносити рідке добриво у борозну (Рис. 1, а);
2. Системи з інжекторним типом (Рис. 1, б) внесення рідких добрив (Bautista et al., 2000);
3. Системи, що відкривають борозну робочим органом типу «лапа культиватора» (Рис. 1, в), після чого вноситься рідке добриво у борозну (Stichler & Livingston, 2003).

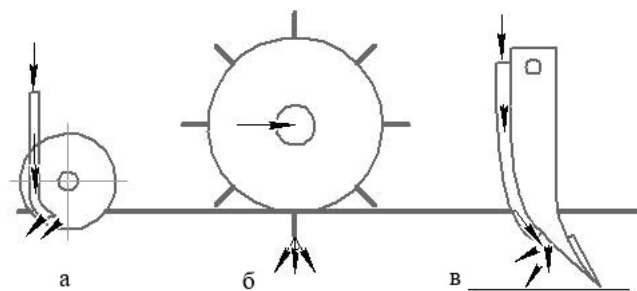


Рис. 1. Систематизація машин та обладнання для внесення рідких добрив.

Крім того, ці системи можуть вносити рідкі добрива безпосередньо на насінину, або ж навколо насінини на певній відстані (Plumlee & Mueller, 2021).

Наприклад, вченими Китаю було розроблено посівний комплекс, що саме відноситься до першого типу, тобто відкриває борозну диском і здатен вносити рідкі добрива в борозну перед та після насінини, для того щоб забезпечити ріст рослин після проростання (Yu et al., 2021). Схожу систему внесення рідких добрив у борозну описує (Ross, 2020). Внесення рідких добрив на ділянках, де використовують no-till, а борозну утворюють дисками описав (Baker, 2007).

Перевагою таких систем, є можливість нанесення інокулянта як безпосередньо на насінину, так і в ґрунт. Однак, недоліком є підвищена витрата рідини.

Одним із найновіших механізмів, що здатні вносити рідкі мінеральні добрива у ґрунт є так звані ін'єкційні робочі органи (Klymchuk et al., 2021; Vetokhin et al., 2021; Shustik et al., 2020; Singh et al., 2020; Nyord et al., 2008), що мають форму колеса та своєрідні «голки», або «інжектори», які на виході мають форсунки для внесення добрив у ґрунт (Рис. 2).



Рис. 2. Вигляд ін'єкційних робочих органів у польових умовах на прикладі зняряддя «Dragon» (Radionov, 2020)

Існує і інший ін'єкційний механізм, що вводить рідке мінеральне добриво у ґрунтовий горизонт на глибину від 50 до 100 см кожні 30 см (da Silva & Magalhães, 2019; da Silva & Magalhães, 2017). Вченими з Китаю було розроблено схожий механізм та доведено його ефективність (Zhou et al., 2019). Однак, такі агрегати не використовують із посівними комплексами, в більшості випадків їх використовують із машинами, що готують поле перед сівбою чи з технікою для догляду за посівами (Tomchuk, 2020 a; Tomchuk, 2020 b). Перевагою таких агрегатів (за теоретичного використання саме під час сівби) є те, що вони здатні забезпечити точне внесення мінерального добрива у ґрунт. А от недоліком є неможливість обробити саму насінину робочим розчином.

Іншими варіантами механізації, що могли б забезпечити проведення інокуляції під час сівби є посівні комплекси, що призначені для внесення рідких мінеральних добрив і утворюють борозну робочим органом типу «лапа культиватора». Прикладами таких агрегатів є посівні комплекси компаній Great Plains, John Deere, Horsch та інші (Lehkodukh & Lehkodukh, 2018; Aniskevych & Rosamakha, 2016; Heruk & Petrychenko, 2014). Кожен із таких посівних комплексів має свої унікальні особливості. Наприклад, фірмою Precision Planting розроблено сошник Furrow Jet та систему vApplyHD (Zubko et al., 2021), що дозволяють вносити рідкі мінеральні добрива на певну відстань вбік від насінини та під нею, а також у борозну (*Rishennia Precision Planting dlia vnesennia ridkykh dobryv*, n.d.). Тоді як посівний комплекс Fendt MOMENTUM має більш широкі опції внесення рідкого добрива, до 25 мм вглиб від насінини (*Tochnyi moment: vse shcho treba znaty pro novu sivalku Fendt MOMENTUM.*, 2020), компанія John Deere розробила посівні комплекси, що здатні вносити рідкі і гранульовані добрива під час сівби, їх використовували у своїх дослідженнях (Randall, 2004; Popescu et al., 2022; Kusi et al., 2021). У Сербії було проведено дослід з прототипом сівалки, що має схожі функції і має назву EUKU-01 (Drazic et al., 2020). Проте, дослідженнями встановлено, що для проведення інокуляції більше підійшли механізми, що здатні забезпечити виконання

технології pop-up (Alley et al., 2010; McGuire, 2014; Till, 2017). Американські вчені розробили сівалку для малих дослідних no-till ділянок, що здатна вносити рідкі мінеральні добрива в рядок за допомогою чизельних ножів (Engel et al., 2003). Схожу систему було розроблено у Пакистані, тести проводились під час сівби кукурудзи, в якості рідкого добрива використовували розведену із водою фосфорну кислоту. Система здатна забезпечити внесення 4 л рідкого добрива на гектар (Ashraf et al., 2017). Подібна система була розроблена і у Індії, але добриво вносили не в рядок, а під насінину (Sundram & Mani, 2020). Важливим є те, що прототип даної сівалки був не тільки розроблений і описаний, а ще й детально вивчені форсунки, які підбирались відповідно до необхідного дозування рідких добрив (Devram & Mani, 2020). Іншими індійськими вченими було розроблено систему, що дозволяє вносити добриво під час сівби безпосередньо в борозну (Doshi et al., 2015). В Україні теж розроблено сівалку машину, що здатна обробляти рідкими мінеральними добривами коренеплоди буряків під час їх посадки (Kostenko et al., 2019).

Перевагою таких машин при використанні їх в якості системи для інокуляції насіння, знову ж таки, є можливість нанесення робочої рідини безпосередньо на насінину. Водночас деякі системи не здатні це забезпечити, оскільки розраховані на внесення рідких добрив на деякій відстані від насінини. Тому це є недоліком, так само як і норма, що вони здатні внести у рядок, в деяких посівних комплексах є завелика. У більшості проаналізованих досліджень, необхідною нормою внесення інокулянту в рядок вважають 50 л/га.

Важливими є дослідження елементів систем, що здатні вносити рідке добриво у борозну. Так, (Sidhu et al., 2020) описав типи форсунок, а малайзійські вчені проводили дослідження із кількістю рідини, що вони можуть пропустити за певної швидкості трактора на одиницю площі (Yamin et al., 2016). Однак, важливим є не лише форсунка якою вноситься рідке добриво, а й швидкість за якої його вносять (Kasal et al., 2018) та тиск у системі, ці параметри для внесення рідких добрив досліджували (Kasal et al., 2019). Вчені із Китаю пішли далі і дослідили вплив типу форсунки (конічна чи секторальна) та кількості рідини, що вилита у рядок на якість посіву та ріст сходів кукурудзи. За їх даними при використанні секторальної форсунки якість сівби була вища, а чим більша кількість води для обприскування була використана у рядку під час сівби, тим швидше з'являлися сходи культури, при цьому зросла і кількість надземної та підземної біомаси (Wang et al., 2019). Експериментами із струменевою форсункою займались (Zheng et al., 2019). Однак, дослідженнями з визначення кількості рідини, що пропускають форсунки займались

і інші вчені (Sharda et al., 2016). У дослідженнях (Scott Tubbs et al., 2012) використовували форсунку, що створює туман, а в дослідженнях (Wilson et al., 2015) для обробки насіння інсектицидом у рядку використовували форсунки із маркуванням Teejet TP8001EVS, а (Gassmann & Weber, 2015) для тих самих цілей використовували Teejet XR80015EVS. Вченими з Китаю були проведені схожі дослідження задля створення сівалки, що здатна вносити пестициди та добрива під час сівби, ними було досліджено три типи форсунок та їх кут розпилення (Huang et al., 2019). Дослідження (Chen et al., 2021) вказують на необхідність застосування сенсорів для моніторингу кількості використання добрив, а (Bai et al., 2022) вивчали можливість підвищення точності внесення рідких добрив після зміни норми. Питанням розробки системи, що здійснює затримку внесення та дозволяє змінювати норму для рідких добрив займались (Zhang et al., 2021). При цьому, дуже важливо проводити вірне калібрування агромашин, що здійснюють внесення рідких добрив (Field & Long, 2018). Також, були проведені дослідження з визначення необхідності застосування спеціальних мікропроцесорів для точного внесення рідких добрив (Xiuyun et al., 2019), контролерів (Garcia et al., 2014; Anitha et al., 2019), або ж покращення програмного забезпечення (Jinlong et al., 2021).

Оскільки не існує чіткого механізму внесення інокулянту в рядок в деяких дослідженнях, було описано методи внесення робочої рідини в борозну шляхом приєднання оприскувача до сівалки (Morais et al., 2016; Sivarajan et al., 2018). Водночас, можна проводити обробку рідким добривом борозни за допомогою ручного обприскувача перед сівалкою (Campo et al., 2010; Oliveira et al., 2018; Glaucia et al., 2017; Grabau et al., 2021). Бразильські вчені застосовували для обробки насіння рідким добривом карбонату кальцію спеціальний аплікатор StandMax Hunter CS, що дозволяє обробити насіння в борозні під час сівби (Nascente & Cobucci, 2015), тоді як американські вчені використовували для обробки насіння в борозні інсектицидами (Boetel et al., 2004) чи рідкими добривами системи розпилення від TM Raven, що встановлені на посівному комплексі (Kaiser et al., 2014). В інших дослідженнях використовувались, навпаки, більш сучасні сошники, що вже обладнані аплікаторами для внесення рідких добрив, для прикладу, фірми Yetter Manufacturing (Rutan & Steinke, 2019).

Висновки. Отже, серед всіх описаних систем або аплікаторів для внесення рідких добрив чи інсектицидів, є системи, що дозволять провести інокуляцію насіння безпосередньо в борозні. Вони мають свої переваги і недоліки. Однак, немає чіткої методики проведення даної операції в польових умовах. Тому, для визначення необхідного агрегату необхідні подальші дослідження.

Бібліографічні посилання:

1. Adeleke, B.S., Ayangbenro, A.S., & Babalola, O.O. (2021). Genomic assessment of *Stenotrophomonas indicatrix* for improved sunflower plant. *Curr Genet*, 67, 891–907. <https://doi.org/10.1007/s00294-021-01199-8>
2. Alley, M. M., Reiter, S., Thomason, W. E., & Reiter, M. S. (2010). Pop-up and/or Starter Fertilizers for Corn.
3. Anishevych, L. V., & Rosamakha, Yu. O. (2016). Konstruktyvni osoblyvosti soshnykovykh system suchasnykh sivalok ta yikh vidpovidnist vymoham tochnoho zemlerobstva [Design features of coulter systems of modern planters and their compliance with the requirements of precision agriculture]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho*

- universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK, (241), 269-278 [in Ukrainian].
4. Anitha, G., Kumar, A. A., Rao, A. S., & Rao, C. S. (2019). Sensor based Planter-cum-Site Specific Fungicide Applicator. *Agricultural Engineering Today*, 43(1), 46-53.
 5. Ashraf, M., Akhtar, M., Ahmad, Q., & Ahmad, S. (2017). Development and laboratory testing of maize planter-cum-liquid fertilizer applicator. *Journal of Agricultural Research*, 55(2).
 6. Bai, J., Tian, M., & Li, J. (2022). Control System of Liquid Fertilizer Variable-Rate Fertilization Based on Beetle Antennae Search Algorithm. *Processes*, 10(2), 357. <https://doi.org/10.3390/pr10020357>
 7. Baker, C. J. (2007). No-tillage Drill and Planter Design – Large-scale Machines. In K. E. Saxton & C. J. Baker (Eds.), *No-tillage Seeding in Conservation Agriculture* (pp. 185-256). CABI.
 8. Bautista, E. U., Suministrado, D. C., & Koike, M. (2000). Mechanical Deep Placement of Fertilizer in Puddled Soils. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 62(1), 146-157. <https://doi.org/10.11357/jsam1937.62.146>
 9. Berdin, S. I., Onychko, V. I., & Murach, O. M. (2013). Vplyv biolohichnykh osoblyvostei sortu na efektyvnist inokuliatcii nasinnia horokhu [Effect of biological characteristics of variety on the inoculation efficiency of pea seeds]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahromoho universytetu. Serii «Ahronomiia i biolohiia»*, 3(25), 182-187 [in Ukrainian].
 10. Boetel, M. A., Dregseth, R. J., Schroeder, A. J., Majumdar, A., & Bredehoeft, M. W. (2004). Granular, liquid, and seed treatment insecticides for management of wireworms in sugarbeet. *Sugarbeet Research and Extension Reports*, 35, 166.
 11. Campo, R. J., Araujo, R. S., Mostasso, F. L., & Hungria, M. (2010). In-furrow inoculation of soybean as alternative to fungicide and micronutrient seed treatment. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 34(4). <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400010>
 12. Chen, K., Zhao, B., Zhou, L., Wang, L., Wang, Y., Yuan, Y., & Zheng, Y. (2021). Real-time missed seeding monitoring planter based on ring-type capacitance detection sensor. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 64(2), 279-288.
 13. da Rosa, D. P., Verardi, J., Girardi, J. S., Conte, P. H., & Spagnolo, R. T. (2020). Inoculation Methods and Doses and Relationship with the Vegetative and Reproductive Development of Soybeans. *Journal of Experimental Agriculture International*, 42(7), 124-132. <https://doi.org/10.9734/JEAI/2020/v42i730561>
 14. da Silva, M. J., & Magalhães, P.S.G. (2019). Modeling and design of an injection dosing system for site-specific management using liquid fertilizer. *Precision Agric*, 20, 649–662. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9602-5>
 15. da Silva, M., & Magalhaes, P. S. G. (2017). A liquid injection dosing system for site-specific fertiliser management. *Biosystems Engineering*, 163, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.005>
 16. Danylchenko, O. M., Kovalenko, I. M., & Butenko, A. O. (2018). Produktivnist chyny pry vnesenni riznykh doz mineralnykh dobryv ta inokuliatcii nasinnia v umovakh pivnichno-skhidnoho Lisostepu Ukrainy [Peavine productivity by mineral fertilization of different doses and seed inoculation under the conditions of North-East Forest Steppe of Ukraine]. *Naukovi horyzonty*, 2, 29-34 [in Ukrainian].
 17. Danylchenko, O.M., & Zhatova, H. O. (2016). Urozhainist i yakist nasinnia kormovykh bobiv ta sochevytsi zalezno vid inokuliatcii bakterialnymy preparatamy i vnesennia mineralnykh dobryv [Yield and seed quality of fodder beans and lentils depending on inoculation with bacterial preparations and application of mineral fertilizers]. *Visnyk Zhytomyrskoho natsionalnoho ahroekolohichnoho universytetu*, 1(1), 94-101 [in Ukrainian].
 18. Datsko, O. M. (2021). Roslynni probiotyky: vplyv na roslyny v umovakh stressu [Plant probiotics: effect on crops under stress]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Agronomy and Biology*, 43(1), 10-18 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2021.1.2>
 19. Denton, M. D., Phillips, L. A., Peoples, M. B., Pearce, D. J., Pearce, A. D., Mele, P. M., & Brockwell, J. (2017). Legume inoculant application methods: effects on nodulation patterns, nitrogen fixation, crop growth and yield in narrow-leaf lupin and faba bean. *Plant and Soil*, 419(1), 25-39. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-017-3317-7>
 20. Devram, L. S., & Mani, I. (2020). Design and development of pressurized aqueous fertilizer application system for seeder. *Agricultural Engineering Today*, 44(1), 12-19. <https://doi.org/10.52151/aet2020441.1514>.
 21. Doshi, T., Joshi, J., Vyas, R., & Upadhyay, P. (2015). Agritech Automation on Seeding and Fertigation: A Revolution in Agriculture. *IJSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(11), 82-87.
 22. Dražić, M. S. (2017). *Development and optimization of novel electronic device for automatic control of liquid starter fertilizer injection in maize sowing*. [Doctoral Dissertation]. Belgrade. <https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/9370>
 23. Drazic, M., Gligorevic, K., Pajic, M., Zlatanovic, I., Spalevic, V., Sestras, P., Skataric, G., & Dudic, B. (2020). The Influence of the Application Technique and Amount of Liquid Starter Fertilizer on Corn Yield. *Agriculture*, 10(8), 347. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080347>
 24. Engel, R. E., Fische, T., Miller, J., & Jackson, G. (2003). A small plot seeder and fertilizer applicator. *Agronomy Journal*, 95(5), 1337-1341. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1337>
 25. Field, H. L., & Long, J. M. (2018). Machinery Calibration. In *Introduction to Agricultural Engineering Technology: A Problem Solving Approach* (pp. 107-142). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69679-9_8
 26. Garcia, A. P., Cappelli, N. L., & Umezu, C. K. (2014). Electrically driven fertilizer applicator controlled by fuzzy logic. *Eng. Agric*, 34(3). <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000300014>
 27. Gassmann, A., & Weber, P. (2015). Evaluation of Bt Corn and Soil-applied Insecticides for Management of Corn Rootworm Larvae. *Iowa State University Research and Demonstration Farms Progress Reports*, 1(1), Iowa State University Research and Demonstration Farms Progress Reports.
 28. Glaucia, C. F., Alessandro, L. B., Fernanda, B. G. A., & Lucas, C. P. (2017). Effects of associated co-inoculation of Bradyrhizobium japonicum with Azospirillum brasilense on soybean yield and growth. *African Journal of Agricultural Research*, 12(1), 6-11. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.1171>

29. Grabau, Z. J., Liu, C., Schumacher, L. A., Small, I. M., & Wright, D. L. (2021). In-furrow fluopyram nematicide efficacy for *Rotylenchulus reniformis* management in cotton production. *Crop Protection*, 140, Crop Protection. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105423>
30. Grabovskiy, M. B. (2018). Substantiation of the corn sowing terms in compatible crops with sweet sorghum. *Agrobiologia*, 1(138), 67-76.
31. He, H., Peng, M., Lu, W., Hou, Z., & Li, J. (2022). Commercial organic fertilizer substitution increases wheat yield by improving soil quality. *Science of The Total Environment*, 851, 158132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158132>
32. Heruk, S. M., & Petrychenko, Ye. A. (2014). Tendentsii rozvytku konstruksii posivnykh ahrehtiv. *Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, (1), 31-45 [in Ukrainian].
33. Huang, X., Wang, W. W., Li, Z. D., Wang, Q. Q., Zhu, C. X., & Chen, L. Q. (2019). Design method and experiment of machinery for combined application of seed, fertilizer and herbicide. *Int J Agric & Biol Eng*, 12(4), 63-71.
34. Ibrahim, H.M., & El-Sawah, A.M. (2022). The Mode of Integration Between Azotobacter and Rhizobium Afect Plant Growth, Yield, and Physiological Responses of Pea (*Pisum sativum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00727-2>
35. Jinlong, F., Shujuan, Y., & Qichao, L. (2021). Design of deep-fertilization mechanism with deformed gears and performance tests. *NMATEH-Agricultural Engineering*, 65(3). <https://doi.org/10.35633/inmateh-65-34>
36. Jordan, D. L., Johnson, P. D., Hare, A. T., Anco, D., Chapin, J., Thomas, J., Monfort, S., & Balota, M. (2018). Influence of Inoculation with Bradyrhizobia and Nitrogen Rate on Yield and Estimated Economic Return of Virginia Market Type Peanut. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 4(1), 1-7. <https://doi.org/10.2134/cftm2018.01.0002>
37. Kaiser, D. E., Lamb, J. A., Bloom, P. R., & Hernandez, J. A. (2014). Comparison of field management strategies for preventing iron deficiency chlorosis in soybean. *Agronomy Journal*, 106(6), 1963-1974. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0296>
38. Kalnahuz, O. M., Semernia, O. V., & Lomekin, D. S. (2021). Sposoby vnesennia dobriv [Fertilizer application methods]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii «Molod i tekhnichniy prohres v APV» Innovatsiini rozrobky v ahrarnii sferi*. 2, 120-122 [in Ukrainian].
39. Kasal, Y. G., Gore, A., Shete, P. P., & Thakkar, M. (2018). Effect of travel speed of tractor on rate of application in liquid fertilizer application system. *Plant Archives*, 18(1), 987-990.
40. Kasal, Y. G., Thakkar, S. K., & Shete, P. P. (2019). Effect of pressure attribute on rate of application in liquid fertilizer application system. *Plant cell biotechnology and molecular biology*, 20(1-2), 67-72.
41. Klymchuk, M., Salo, Ya., Dumych, V., & Vetokhin, V. (2021). Alternatyvni tekhnichni zasoby dlia vnesennia ridkykh dobriv v shar gruntu [Alternative technical means for applying liquid fertilizers to the soil layer]. *Naukovo-tekhnicni zasady rozroblennia, vyprovuvannia ta prohnozuvannia silskohospodarskoi tekhniki i tekhnolohii Materialy XXI Mizhnarodnoi naukovoi konferentsii 22 veresnia 2021 roku*, 76-80 [in Ukrainian].
42. Kostenko, O., Lapenko, H., Prasolov, Y., Lapenko, T., & Kalinichenko, A. (2019). Increasing the effectiveness of aggregates for planting sugar beet seedlings to receive elite seeds. *Agronomy Research*, 17(4), 1649-1664. <https://doi.org/10.15159/ar.19.194>
43. Kotenko, S.S., & Ratushnyi, V.V. (2017). Tekhnichni zasoby dlia mekhanizovanoi obroby nasinnia biopreparatamy [Technical means for mechanized processing of seeds with biological preparations]. *Materialy III Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii (u ramkakh II naukovoho forumu «Naukovy tyzhden u Krutakh – 2017», 13-14 bereznia 2017 r., s. Kruty, Chernihivska obl.)*, 1, 162-170 [in Ukrainian].
44. Kumawat, K. C., Singh, I., Nagpal, S., Sharma, P., Gupta, R.K., & Sirari, A. (2022). Co-inoculation of indigenous *Pseudomonas oryzae* and *Bradyrhizobium* sp. modulates the growth, symbiotic efficacy, nutrient acquisition, and grain yield of soybean. *Pedosphere*, 32(3), 438-451. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60085-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60085-1)
45. Kusale, S.P., Attar, Y. C., Sayyed, R.Z., Enshasy, H.E., Hanapi, S.Z., Ilyas, N., Elgorban, A.M., Bahkali, A.H., & Marraiki, N. (2021). Inoculation of *Klebsiella variicola* alleviated salt stress and improved growth and nutrients in wheat and maize. *Agronomy*, 11(5), 927. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050927>
46. Kusi, N. Y. O., Stevens, W. B., Sintim, H. Y., y Garcia, A. G., & Mesbah, A. O. (2021). Phosphorus fertilization and enhanced efficiency products effects on sugarbeet. *Industrial Crops and Products*, 171, 113887. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113887>
47. Kyveryga, P. M., Mueller, T. A., & Mueller, D. S. (2018). On-farm replicated strip trials. *Precision agriculture basics*, 198-207. <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0096>
48. Lehkodukh, I., & Lehkodukh, H. (2018). Vnesennia dobriv posivnymy ta gruntoobrobnymy mashynamy [Application of fertilizers by sowing and tillage machines]. *Tekhnika i tekhnolohii APK*, 2(110), 33-37 [in Ukrainian].
49. Manea, D., Marin, E., Sorică, C., & Nedelcu, A. (2009). Mechanized Application of the Microbial Inoculants at Vegetable Plants Sowing. *Bulletin UASMV Agriculture*, 66(1), 381-386.
50. McGuire, A. (2014). High residue farming under irrigation: residue management through planting.
51. Mehboob, N., Minhas, W.A., Naeem, M., Yasir, T.A., Naveed, M., Farooq, S., & Hussain, M. (2022). Seed priming with boron and *Bacillus* sp. MN54 inoculation improves productivity and grain boron concentration of chickpea. *Crop and Pasture Science*, 73(5), 494-502. <https://doi.org/10.1071/CP21377>
52. Semernia, O. V., & Kalnahuz, O. M. (2016). Shchodo vnesennia ridkykh mineralnykh dobriv [Regarding the introduction of liquid mineral fertilizers]. *Materialy mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii-forumu «Rozumna ahrotekhnika dlia efektyvnoho zemlerobstva»*, 39 [in Ukrainian].

53. Mockeviciene, I., Repsiene, R., Amaleviciute-Volunge, K., Karcauskiene, D., Slepeticene, A., & Lepane, V. (2022). Effect of long-term application of organic fertilizers on improving organic matter quality in acid soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(9), 1192-1204. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1875130>
54. Morais, T. P. D., Brito, C. H. D., Brandão, A. M., & Rezende, W. S. (2016). Inoculation of maize with *Azospirillum brasilense* in the seed furrow. *Revista Ciência Agrônômica*, 47, 290-298. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160034>
55. Nascente, A. S., & Cobucci, T. (2015). Soil phosphorus availability and dry bean yield as affected by the application of liquid calcium carbonate micron particles on the furrow. *Afr. J. Agric. Res.*, 10(15), 1840-1851. <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.8694>
56. Nyord, T., Sogaard, H. T., Hansen, M. N., & Jensen, L. S. (2008). Injection methods to reduce ammonia emission from volatile liquid fertilisers applied to growing crops. *Biosystems Engineering*, 100(2), 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.01.013>
57. Oliveira, D. P., Pereira, T. D. A., Rufini, M., Martins, F. A. D., da Silva Junior, C. L., Baptista, M. V. B. D. G., da Silva, J. S., de Oliveira, P. A. C., da Silva Aragão, S. O., de Andrade, M. J. B., & de Souza Moreira, F. M. (2019). Liquid Inoculation with *Rhizobia* in the Planting Furrow of Common Bean under No-Till Is Feasible under Different Soil and Climatic Conditions. *Crop Science*, 59(5), 2178-2184. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.08.0522>
58. Oliveira, D. P., Soares, B. L., Martins, F. A. D., Franceschini, L. A., Cardillo, B. E. D. S., Rufini, M., de Morais, A. R., de Souza Moreira, F. M., & de Andrade, M. J. B. (2018). Viability of liquid medium-inoculation of *Rhizobium etli* in planting furrows with common bean. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53, 394-398. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000300015>
59. Ovcharuk, O. V., Kalenska, S. M., Ovcharuk, O. V., & Khomina, V. Y. (2020). Biological fixation of nitrogen by agrocenoses of soy and application of inoculants. *Current state of science in agriculture and environmental management: theory and practice (November 20, 2020)*, 132-135.
60. Palgrave, D. A. (Ed.). (2020). *Fluid Fertilizer Science and Technology*. Taylor & Francis Group.
61. Pierson, W. L., Kandel, Y. R., Allen, T. W., Faske, T. R., Tenuta, A. U., Wise, K. A., & Mueller, D. S. (2018). Soybean Yield Response to In-furrow Fungicides, Fertilizers, and Their Combinations. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 4(1), 1-9. <https://doi.org/10.2134/cftm2017.10.0073>
62. Plumblee, M. T., & Mueller, J. D. (2021). Implementing precision agriculture concepts and technologies into crop production and site-specific management of nematodes. In R. A. Sikora, J. Desaegeer, & L. Molendijk (Eds.), *Integrated Nematode Management: State-of-the-art and Visions for the Future* (pp. 421-427). CAB International. <https://doi.org/10.1079/9781789247541.0059>
63. Popescu, E., Nenciu, F., & Vladut, V. (2022). A new strategic approach used for the regeneration of soil fertility, in order to improve the productivity in ecological systems. *Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*, 11, 265-272.
64. Qiao, D., Li, N., Cao, L., Zhang, D., Zheng, Y., & Xu, T. (2022). How Agricultural Extension Services Improve Farmers' Organic Fertilizer Use in China? The Perspective of Neighborhood Effect and Ecological Cognition. *Sustainability*, 14(12), 7166. <https://doi.org/10.3390/su14127166>
65. Radionov, D. (2020, October 23). Dragon – rishennia dlia ratsionalnoho vnesennia dobryv [Dragon is a solution for rational application of fertilizers] – Ahrobiznes sohodni [in Ukrainian]. <http://agro-business.com.ua/2017-09-29-05-56-43/item/19148-dragon-ishennia-dlia-ratsionalnoho-vnesennia-dobryv.html>
66. Randall, G. (2004). Optimum phosphorus placement for reduced tillage systems. In *Proceedings of the Wisconsin Fertilizer, Aglime and Pest Management Conference*, 43, 10.
67. Rezende, W. S., Brandão, A. M., Brito, C. H. D., & Morais, T. P. D. (2016). inoculation of maize with *Azospirillum brasilense* in the seed furrow. *Revista Ciência Agrônômica*, 47(2), 290-298. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160034>
68. *Rishennia Precision Planting dlia vnesennia ridkykh dobryv [Precision Planting solutions for applying liquid fertilizers]. (n.d.). Amako [in Ukrainian].* <https://amaco.int.com/ua/selhoztehnika/liquid-fertilizers/>
69. Ross, P. (2020). Reviving GrubPlan to ensure appropriate use and application of imidacloprid for control of cane grubs.
70. Rutan, J., & Steinke, K. (2019). Corn nitrogen management following daikon radish and forage oat cover crops. *Soil Science Society of America Journal*, 83(1), 181-189. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.07.0269>
71. Sahu, P. K., Gupta, A., Singh, M., Mehrotra, P., & Brahmprakash, G. P. (2018). Bioformulation and Fluid Bed Drying: A New Approach Towards an Improved Biofertilizer Formulation. In R. S. Sengar & A. Singh (Eds.), *Eco-friendly Agro-biological Techniques for Enhancing Crop Productivity*. Springer Nature Singapore. 10.1007/978-981-0-6934-5_3
72. Schiffmann, J., & Alper, Y. (1968). Inoculation of peanuts by application of *Rhizobium* suspension into the planting furrows. *Experimental Agriculture*, 4(3), 219-226.
73. Scott Tubbs, R., Harris, G. H., Beasley, J. P., Smith, A. R., & Smith, N. B. (2012). Effect of inoculant and nitrogen application at planting on peanut production in Georgia. *Crop Management*, 11(1), 1-11. <https://doi.org/10.1094/CM-2012-0823-01-RS>
74. Sharda, A., Fulton, J. P., & Taylor, R. K. (2016). Performance of variable-orifice nozzles for liquid fertilizer applications. *Applied Engineering in Agriculture*, 32(3), 347-352. <https://doi.org/10.13031/aea.32.11428>
75. Shustik, L., Nilova, N., Stepchenko, S., Sydorenko, S., & Klochai, O. (2020). Doslidzhennia efektyvnosti zastosuvannya aplikatora DRAGON 6000 dlia vnesennia ridkykh dobryv KAS u resursooshchadnykh tekhnolohiiakh [Study of the effectiveness of the applicator dragon6000 for application of liquid CAS fertilizers in resource-saving technology]. *Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprovuvannya novoi tekhniki i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*, 27(41), 268-279 [in Ukrainian].

76. Sidhu, Y.-S., Singh, H. S., Jat, M., Chhokar, H. S., Setia, R. S., R., & Jat, M. L. (2020). *Conservation agriculture and scale of appropriate agricultural mechanization in smallholder systems. Manual*. Borlaug Institute for South Asia (BISA), International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT).
77. Singh, S. P., Kumar, A., & Kushwaha, H. L. (2020). Sugar cane Canopy Spraying: A Perspective Solution with Ergonomics and Mechatronics Approach. *Sugar Tech*, 22, 203–207. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00766-1>
78. Sivarajan, S., Maharlooei, M., Bajwa, S. G., & Nowatzki, J. (2018). Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil and Tillage Research*, 175, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.001>
79. Stichler, C., & Livingston, S. (2003). Reduced/Conservation Tillage in South and Central Texas. *Texas FARMER Collection*. <https://hdl.handle.net/1969.1/87182>.
80. Sundaram, P. K., Mani, I. D., Lande, S. A. T. I. S. H., Parray, R. A., & Khura, T. K. (2019). Design and Development of Fertilizer Metering System for Tractor drawn Liquid Fertilizer Applicator: Interaction of Root and microbes. *Journal of AgriSearch*, 6(4), 211-214.
81. Sundram, P. K., & Mani, I. (2020). Development of Liquid Fertilizer Applicator. *Journal of AgriSearch*, 5(4), 291-293.
82. Till, S. (2017). *A cost-effective approach for combining nematicides, starter fertilizers, and plant growth regulators in order to create a sustainable management system for the southern root-knot nematode, Meloidogyne incognita, in corn*.
83. Tkachuk, A. P. (2014). Seed inoculation as an important ecological factor in increasing productivity of galega vegetative mass. *Feeds and Feed Production*, (77), 85-88.
84. *Tochnyi moment: vse shcho treba znaty pro novu sivalku Fendt MOMENTUM. (2020, July 28). Kurkul [in Ukrainian].* <https://kurkul.com/spetsproekty/843-tochniy-momentum-vsi-harakteristiki-novoyi-sivalki-fendt-yaki-treba-znati-persh-nij-kupiti>
85. Tomchuk, V. (2020 b). Trends of plant fertilization under new production conditions. *Slovak international scientific journal*, 1, 7-17.
86. Tomchuk, V.V. (2020 a). Praktychni aspekty vykorystannia znariaddia z holchastymy inzhektsiynymy robochymy orhanamy dlia zhyvlennia roslyn [Practical aspects of using tools with bristle injection working bodies for plant nutrition]. *Mizhnar. nauk. konf. «Naukovo-tekhnichni zasady rozrobky, vyprobuvannia ta prohnozuvannia silskohospodarskoi tekhniki i tekhnolohii», 13 veres. 2019 r.-Doslidnytske*, 69-70 [in Ukrainian].
87. Trimurtulu, N., Rao, D. L. N., Trimurtulu, N., & Amaravathi, G. (2014). Liquid microbial inoculants and their efficacy on field crops, ANGRAU. *Agricultural Research Station, Amaravathi*, 54.
88. Tubbs, R. S., Kemerait, R. C., Williams, B., & Sarver, J. M. (2015). Effect of Bradyrhizobia inoculant formulation with phorate in new peanut fields. *Peanut Science*, 42(2), 138-144.
89. Vetokhin, V., Nehrebetskyi, I., Ryzhkova, T., Salo, Ya., & Vozniuk, T. (2021). Analitichnyi ohliad tekhnichnykh rishen holchastykh rotatsiynykh znariad dlia vnesennia ridkykh dobryv u shar gruntu [Analytical review of technical solutions of needle rotary tools for applying liquid fertilizers to the soil layer]. *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniki i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*, 29(43), 95-107 [in Ukrainian]. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-29\(43\)-9](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2021-1-29(43)-9)
90. Wang, W., Wang, W., Jia, H., Zhuang, J., & Wang, Q. (2019). Effects of seed furrow liquid spraying device on sowing quality and seedling growth of maize. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(2), 68-74.
91. Welver, M. (2019). Efficiency of chickpea seed bacterization. *Agrarian science and education in the european integration context*, 68-72.
92. Wilson, R. G., Orloff, S. B., & Taylor, A. G. (2015). Evaluation of insecticides and application methods to protect onions from onion maggot, *Delia antiqua*, and seedcorn maggot, *Delia platura*, damage. *Crop Protection*, 67, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.10.002>
93. Xiuyun, X., Xufeng, X., Zelong, Z., Bin, Z., Shuran, S., Zhen, L., Tiansheng, H., & Huixian, H. (2019). Variable Rate Liquid Fertilizer Applicator for Deep-fertilization in Precision Farming Based on ZigBee Technology. *IFAC-PapersOnLine*, 52(30), 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.487>
94. Yamin, M., Wan Ismail, W. I., Mohd Kassim, M. S., Abd Aziz, S., & Shamshiri, R. (2016). VRT liquid fertilizer applicator for soil nutrient management. *Jurnal Teknologi*, 78(1-2), 73-78. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.7271>
95. Yu, C., Wang, Q., Cao, X., Wang, X., Jiang, S., & Gong, S. (2021). Development and Performance Evaluation of a Precise Application System for Liquid Starter Fertilizer while Sowing Maize. In: *Actuators. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 10(9), 221. <https://doi.org/10.3390/act10090221>
96. Zhang, J., Liu, G., Huang, J., & Zhang, Y. (2021). A Study on the Time Lag and Compensation of a Variable-Rate Fertilizer Applicator. *Applied Engineering in Agriculture*, 37(1), 43-52. <https://doi.org/10.13031/aea.13855>
97. Zheng, W., Jiang, Y., Ma, X., & Qi, Q. (2019). Development of a liquid-jet nozzle for fertilizer injection in paddy fields using CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167, 105061. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105061>
98. Zhou, W., Wang, J., & Tang, H. (2019). Structure optimization of cam executive component and analysis of precisely applying deep-fertilization liquid fertilizer. *Int J Agric & Biol Eng*, 12(4), 104-109. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191204.4865>
99. Zubko, V. M. (2021). Doslidzhennia vplyvu chystoty posivnoi borozny na vrozhainist pry vyroshchuvanni kukurudzy na zerno [Study of the influence of the purity of the sowing furrow on the yield in cultivation of maize on grain]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*, 4(46), 11-17 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.4.2>

100. Zubko, V. M., Khvorost, T. V., & Litvinenko, Y. Y. (2021). Doslidzhennia efektyvnosti vykorystannia systemy smart firmer za vyroshchuvannia kukurudzy na zerno [Research of efficiency of using the smartfirmer system in growing corn on grain]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, 3(45), 18-23 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.3>

Shelest M. S., Candidate for Higher Education of Doctor of Philosophy, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Modern systems of inoculation of seed material of row crops

Inoculation of seed material is quite often studied by scientists from the point of view of the influence of the process on the development of culture. However, there is very little information on ensuring the technological operation of wet seed inoculation itself. At the same time, the inoculation process is mainly provided by outdated means of mechanization. Although inoculation is quite often used in Ukraine when growing legumes, the process of treating seeds with inoculants has not yet been optimized. Most often, for carrying out a technological operation, seed treatment units are used, which requires not only large energy costs, but also the involvement of a large number of workers. Therefore, the purpose of this study was to study agricultural machines capable of carrying out inoculation precisely during the sowing of crops to ensure compliance with agricultural requirements and increase the energy efficiency of agricultural enterprises. In the analysis of literary sources, three systems were identified and analyzed that could theoretically meet the requirements of driving operators and agronomists during inoculation. Among them are systems that open the furrow with a disc or cultivator and injector systems. For each of them, the advantages and disadvantages of their operation as a system for inoculation have been identified. The most suitable means for inoculation, which can meet the needs of agricultural producers, were determined to be the special StandMax Hunter CS applicator and the spraying systems from TM Raven, which are installed on sowing complexes and used by foreign agricultural producers. Also, the article highlights the features of the systems and components used in them. Among them are the types of nozzles that can be used in inoculation systems; sensors to monitor liquid spillage; microprocessors and software are also integral components. However, during the search and analysis of literature sources, no methodology and recommendations were found for applying inoculants to the soil during sowing, so this topic deserves further, more detailed research.

Key words: grain, sowing, seeder, seeding device, quality.

НОТАТКИ