

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.17

УДК 66.045.129.2

**Клімов Р.О.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри теплоенергетики, ORCID: 0000-0002-7061-7028, e-mail: klroma@ukr.net

**Анісімов Д.О.**, здобувач другого (магістерського) рівня, e-mail: ptter@i.ua  
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**Klimov Roman**, Candidate of technical sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Thermal Power Engineering

**Anisimov Denis**, master's degree student  
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

## РОЗВИНЕНІ ПОВЕРХНІ ЯК ФАКТОР ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ТЕПЛООБМІННИКІВ

*Оптимізація геометричних параметрів теплообмінних апаратів може проводитись за багатьма параметрами. Одними з найважливіших є геометричні розміри. Розробка оптимізованої конструкції теплообмінника за допомогою методів планування експерименту є актуальною задачею. Це дозволяє мінімізувати витрати матеріалів на виготовлення апаратів та найбільш ефективно передавати теплоту.*

*Метою роботи є визначення впливу таких факторів як довжина однієї оребреної трубки, несучий діаметр оребрення трубки та коефіцієнт оребрення на оптимальне конструктивне виконання підігрівача стисненого повітря за показником мінімальної довжини трубної системи.*

*За допомогою розробленої методики можна в достатньо простій постановці проаналізувати значення довжини трубчастої системи теплообмінника при різних поєднаннях наведених факторів та оптимізувати його конструкцію.*

**Ключові слова:** підігрівач; оребрена поверхня; труба; довжина; фактор.

*Optimization of the geometrical parameters of heat exchangers can be carried out in many ways. One of the most important are geometric dimensions. The development of an optimized heat exchanger design by means of experiment planning methods is an urgent task. This allows minimizing the consumption of materials for the manufacture of devices and the most efficient transfer of heat.*

*The aim of the work is to determine the influence of factors such as the length of one finned tube, the bearing diameter of the finned tube and the finning coefficient on the optimal design of the compressed air heater in terms of the minimum length of the pipe system.*

*Using the developed technique, it is possible in a fairly simple formulation to analyze the value of the length of the tubular system of the heat exchanger for various combinations of the above factors and optimize its design.*

**Keywords:** heater; ribbed surface; pipe; length; factor.

### Постановка проблеми

На більшості промислових підприємств є потреба в стисненому повітрі для приводу багатьох типів пневматичного устаткування. Компресорні станції, які подають стиснене повітря до споживачів, є одними з найбільш енергоємних в різних галузях промисловості [1—3]. Одним із способів зменшення витрати стисненого повітря споживачами є збільшення його температури при подачі до них [2, 3]. Розглядаючи роботу різних пневмоінструментів можна виділити той факт, що вони в першу чергу залежать від об'ємної витрати повітря, а не від масової. Таким чином даний спосіб зменшення витрат є достатньо актуальним [3].

Оптимізація геометричних параметрів теплообмінників може проводитись за багатьма параметрами. Одними з найважливіших є геометричні розміри, а саме об'єм теплообмінника або довжина трубок підігрівачів [4]. Розробка оптимізованої конструкції теплообмінника за допомогою методів планування експерименту є актуальною задачею. Це дозволяє мінімізувати витрати матеріалів на виготовлення апаратів та найбільш ефективно передавати теплоту.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Інтенсифікації теплообміну завжди приділяється велика увага для будь-якої галузі промисловості та техніки. До конструкцій теплообмінного устаткування висувають високі вимоги, які пов'язані зі зменшенням їх маси, займаного об'єму та ін. Перспективним напрямком є використання поверхонь теплообміну з великою площею, тобто розвинених, чого досягають оребренням первинної поверхні. Оптимальна конструкція розвинення поверхні визначається значеннями коефіцієнтів тепловіддачі від гарячого теплоносія до розділової стінки трубки теплообмінника та від стінки до холодного теплоносія. Найбільшого застосування знаходять оребрені поверхні з накатними ребрами, які є достатньо зручними у виготовленні та подальшій експлуатації [2—5].

Залежно від мети створення апарату в якості критерію оптимальності можуть бути прийняті різні величини. При необхідності розміщення теплообмінника в обмеженому просторі в якості критерію може бути обраний його габаритний об'єм або який-небудь з його габаритних розмірів. Основна вимога до критерію оптимальності полягає в тому, що це повинна бути єдина величина, яка, по можливості, найбільш повно відповідає поставленій меті створення апарату. Саме неможливість задовольнити одночасно більш ніж одному критерію оптимальності і вимагає від цієї величини найбільш повної відповідності меті створення апарату. При розрахунку теплообмінників використовуються залежності, кожна з яких є кількісний зв'язок між деякою характеристикою апарату і факторами, що впливають на неї. Наприклад, коефіцієнти тепловіддачі представляються у вигляді функцій швидкостей, властивостей теплоносіїв, різниць температур і т.п. [4].

При проведенні дослідження необхідно експериментально простежити, як змінюються характеристики моделі при зміні факторів, що впливають на неї. Отримана при цьому інформація є вихідним матеріалом для побудови шуканої залежності. Основна вимога до критерію оптимальності полягає в тому, що це повинна бути єдина величина, яка, по можливості, найбільш повно відповідає поставленій меті створення апарату. Саме неможливість задовольнити одночасно більш ніж одному критерію оптимальності і вимагає від цієї величини найбільш повної відповідності меті створення апарату.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою роботи є визначення впливу таких факторів як довжина однієї оребреної трубки, несучий діаметр оребрення трубки та коефіцієнт оребрення на оптимальне конструктивне виконання підігрівача стисненого повітря за показником мінімальної довжини трубної системи.

#### **Виклад основного матеріалу**

У дослідженні приймаємо вихідні дані та параметри повітря, гріючої води та методу теплого розрахунку для проектування підігрівача стисненого повітря, як і в роботі [2], а також трирядне шахове компонування трубчастої оребреної системи, як найбільш раціональне для заданих умов проектування, що доведено в [3].

З метою раціональної постановки експерименту з вивчення процесу побудування оптимальної конструкції теплообмінного апарату за критерієм мінімальної довжини трубчастої системи та визначення стаціонарної області в умовах зміни факторів впливу обрано центральний композиційний план другого порядку  $k = 3$  [6]. Такий план дозволить визначити майже стаціонарну область або область оптимуму.

Дослідженню підлягають наступні фактори:  $x_1$  — довжина однієї трубки, м;  $x_2$  — несучий діаметр оребрення, м;  $x_3$  — коефіцієнт оребрення. За функцію відгуку прийнята загальна довжина труб теплообмінника  $y_1$ , м.

Рівні та інтервали варіювання факторів приведені в табл. 1, а матриця планування та експериментальні дані при проведенні досліджень — в табл. 2.

Таблиця 1. Рівні та інтервали варіювання факторів

Рівні та інтервали варіювання факторів	Довжина трубки $x_1$ , м	Несучий діаметр оребрення $x_2$ , м	Коефіцієнт оребрення $x_3$
Нульовий рівень ( $x=0$ )	0,4	0,016	9,0
Інтервал варіювання	0,2	0,004	4,0
Верхній рівень (+1)	0,6	0,02	13,0
Нижній рівень (-1)	0,2	0,012	5,0
Зіркова точка (+1,215)	0,643	0,02086	13,86
Зіркова точка (-1,215)	0,157	0,01114	4,14

Таблиця 2. Матриця планування та експериментальні дані при проведенні досліджень

Складова плану	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$
№ 1	+1	+1	+1	6,6
№ 2	-1	+1	+1	4,4
№ 3	+1	-1	+1	6,0
№ 4	-1	-1	+1	3,8
№ 5	+1	+1	-1	8,4
№ 6	-1	1	-1	5,0
№ 7	1	-1	-1	7,8
№ 8	-1	-1	-1	4,6
№ 9	-1,215	0	0	3,93
№ 10	+1,215	0	0	6,98
№ 11	0	-1,215	0	5,6
№ 12	0	+1,215	0	6,0
№ 13	0	0	-1,215	6,8
№ 14	0	0	1,215	5,2
№ 15	0	0	0	6,0

Зв'язок між іменованими та кодованими величинами можна знайти з рівнянь

$$x_1 = \frac{l_1 - 0,4}{0,2}; \quad x_2 = \frac{d_n - 0,016}{0,004}; \quad x_3 = \frac{k_{or} - 9}{4}, \quad (1)$$

де  $l_1$  — довжина однієї трубки, м;  $d_n$  — несучий діаметр оребрення, м;  $k_{or}$  — коефіцієнт оребрення труби.

Таким чином, з матриці планування видно, що досліди, виконані із залученням точок, забезпечують доказ наявності екстремального значення функції відгуку.

Для прийнятого плану модель має вигляд [6]

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (2)$$

Формули для розрахунку коефіцієнтів регресії [18]

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}; \quad b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N (x'_{iu})^2 y_u}{\sum_{u=1}^N (x'_{iu})^2}; \quad x'_{iu} = x_{iu}^2 - \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2;$$

$$b_o = b'_0 - b_{11}\bar{x}_1^2 - b_{22}\bar{x}_2^2 - b_{33}\bar{x}_3^2; \quad b'_0 = \frac{\sum_1^N y_u}{\sum_1^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_1^N y_u}{N}; \quad \bar{x}_i^2 = \frac{\sum_1^N x_i^2}{N}, \quad (3)$$

де  $N$  — кількість дослідів.

Виконуючи розрахунки за рівняннями (1)–(3) отримуємо математичну модель досліджуваного процесу

$$y_1 = 5,812 + 1,344x_1 + 0,245x_2 - 0,634x_3 + 0,025x_1x_2 - 0,275x_1x_3 + 0,025x_2x_3 - 0,203x_1^2 + 0,031x_2^2 + 0,166x_3^2. \quad (4)$$

Для перевірки адекватності моделі використовуємо критерій Фішера [6]. Знаючи число ступенів свободи для меншої та більшої дисперсій, для 95 % довірчої ймовірності табличне значення критерію Фішера дорівнює  $F_{cr} = 2,9$  [6], розрахункове  $F = 2,4$ . Порівняння розрахункового та табличного значень критерію Фішера  $F < F_{cr}$  показує, що рівняння моделі (4) адекватне істинній залежності з довірчою ймовірністю 95 %.

Перевірка значущості коефіцієнтів проводилася за «порогами» значущості для різних ефектів факторів. Порівняння коефіцієнтів регресії за абсолютними величинами при розрахованих довірчих інтервалах показує, що для даної моделі можна не вважати статистично значущими коефіцієнти  $b_{12}$ ,  $b_{23}$  та  $b_{22}$ , які можна виключити з рівняння (4). У зв'язку з цим розглянуте рівняння можна спростити до виду

$$y_1 = 5,812 + 1,344x_1 + 0,245x_2 - 0,634x_3 - 0,275x_1x_3 - 0,203x_1^2 + 0,166x_3^2. \quad (5)$$

Загальний вид отриманої моделі приведено на рис. 1, 2.

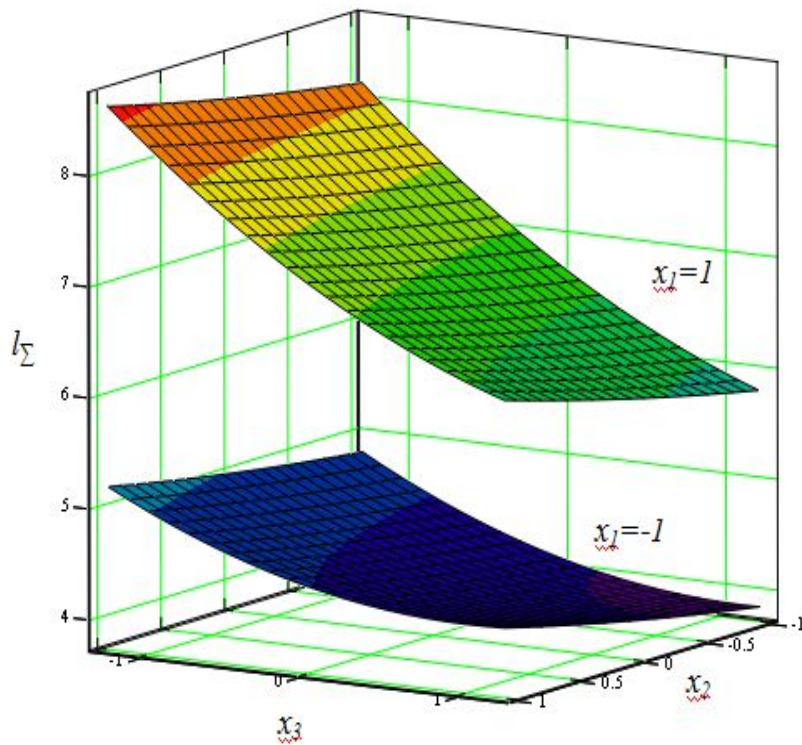


Рис. 1. Залежність загальної довжини трубок теплообмінника від факторів  $x_2$  та  $x_3$  при  $x_1 = -1$  та  $x_1 = +1$

Аналізуючи отримане рівняння (5) видно, що найбільший вплив на загальну довжину труб теплообмінника має фактор  $x_1$ , тобто довжина однієї трубки поперек потоку повітря. Вторинне значення на загальну довжину труб має коефіцієнт оребрення, а знак вказує на те, що зі збільшенням коефіцієнту оребрення загальна довжина буде зменшуватися. Останнє місце за впливом на значення шуканої функції є несучий діаметр оребрення. Це також видно з рис. 1, 2: різниця між двома приведеними функціями найбільша для зміни  $x_1$  (рис. 1), а зворотна залежність для  $x_2$  (рис. 2, а). Протилежні значення коефіцієнтів при квадратах параметрів  $x_1$  та  $x_3$  мають нівелюючий ефект дії до первинного впливу.

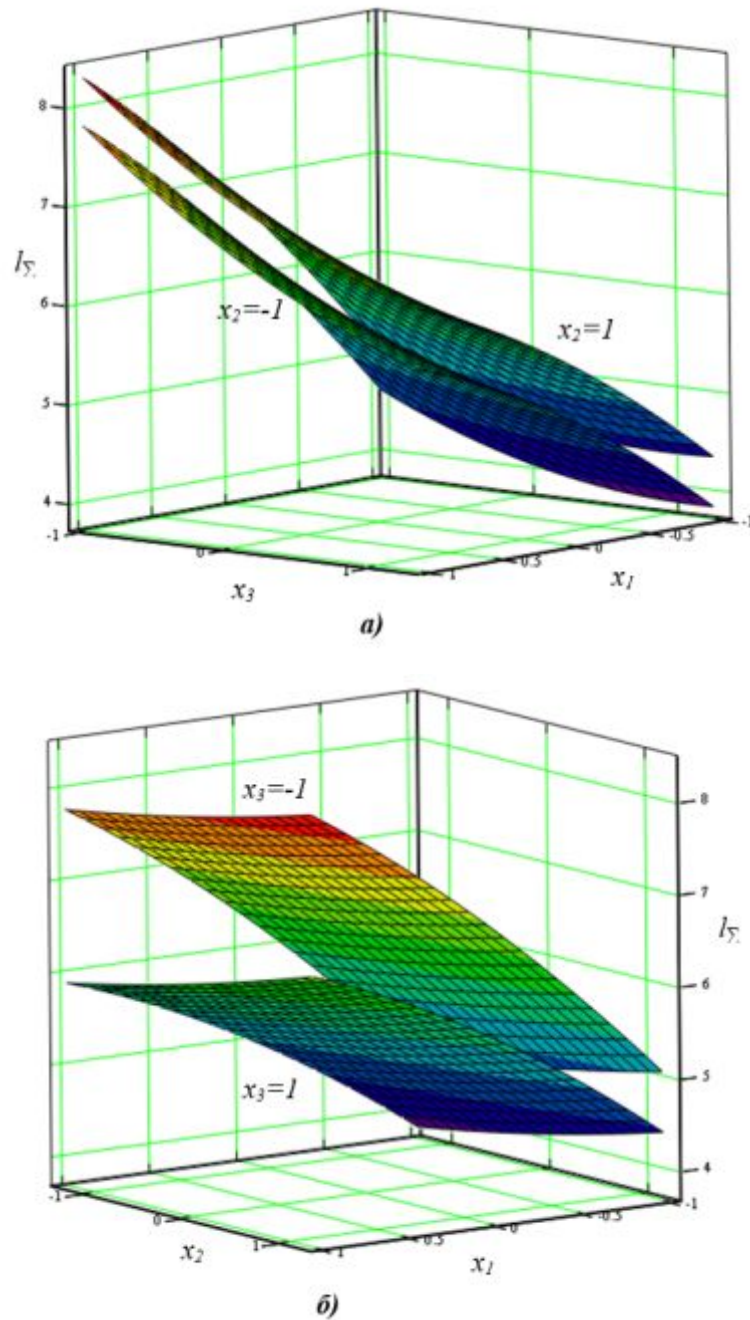


Рис. 2. Залежність загальної довжини труб теплообмінника від факторів  $x_1$  та  $x_3$  при  $x_2 = -1$  та  $x_2 = +1$  (а) та від факторів  $x_1$  та  $x_2$  при  $x_3 = -1$  та  $x_3 = +1$  (б)

Досягнути зменшення загальної довжини трубок можна зменшенням довжини однієї трубки та несучого діаметру оребрення (додатне значення коефіцієнту  $b_1$  та  $b_2$ ) та збільшуючи коефіцієнт оребрення трубки (від'ємне значення коефіцієнту  $b_3$ ). Зменшення довжини однієї трубки призводить до більшого ефекту в зниженні загальної довжини трубок теплообмінника ніж відповідна зміна інших факторів. Сумісний вплив факторів  $x_1$  та  $x_3$  лише додає вагомості коефіцієнту оребрення.

Підставляючи (1) в рівняння (5) можна отримати

$$l_{\Sigma} = 165,47l_1 + 61,25d_n + 6,53k_{or} - 17,19l_1k_{or} - 5,08l_1^2 + 0,0104k_{or}^2 - 58,28. \quad (6)$$

Підставляючи значення довжини однієї трубки, несучого діаметру оребрення та коефіцієнту оребрення в рівняння (6) можна визначити загальну довжину трубок необхідну для підігрівача. Дане рівняння в достатньо простому вигляді дозволяє проаналізувати вплив основних факторів на знаходження мінімальної величини  $l_{\Sigma}$  при заздалегідь заданому значенні одного з параметрів.

Дані про вплив досліджуваних факторів  $x_1$ ,  $x_2$  та  $x_3$  на сумарну довжину використаних трубок видно з рис. 1. Так при  $x_1 = -1$  можливе досягнення мінімуму загальної довжини при значенні  $x_3 = 1.006$ . При інших значеннях довжини однієї трубки та коефіцієнту оребрення мінімуму шуканої функції в обраному діапазоні зміни параметрів не спостерігається, так само як і для інших значень несучого діаметру оребрення обраних трубок, що видно з загального виду отриманої моделі приведеної на рис. 1, 2.

#### Висновки

Проведено дослідження впливу довжини однієї оребреної трубки, несучого діаметру оребрення та коефіцієнту оребрення труби на загальну довжину трубчастої системи підігрівача. За впливом найбільшого значення має довжина однієї трубки, а коефіцієнт оребрення має вторинне значення. При значному збільшенні коефіцієнту оребрення труб зменшується загальна довжина труб.

Розроблена методика дозволяє визначити оптимальне значення такого параметру, як загальна довжина оребрених трубок. Також на основі отриманих результатів можна розробити відповідну конструкцію теплообмінника при прийнятій кількості трубок поперечно потоку теплоносія, який нагрівається. За допомогою розробленої методики можливо в достатньо простій постановці проаналізувати значення довжини трубчастої системи теплообмінника при різних поєднаннях наведених факторів та оптимізувати його конструкцію.

#### Список використаної літератури

1. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств. Навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 200 с.
2. Клімов Р.О. Оптимізація конструктивного виконання теплообмінних апаратів. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2020. 1(36). С.88–93.
3. Клімов Р.О., Луста Є.О. Багатофакторні моделі проектування теплообмінників. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2020. 2(37). С.49–54.
4. Маньковский О.Н. Теплообменная аппаратура химических производств. Л.: Химия, 1976. 368 с.
5. Кунтыш В.Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
6. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

## DEVELOPED SURFACES AS A FACTOR FOR OPTIMIZING THE DESIGN OF HEAT EXCHANGERS

### Abstract

Optimization of the geometric parameters of heat exchangers can be carried out according to many parameters. One of the most important are geometric dimensions. The development of an optimized heat exchanger design using experimental planning methods is an urgent task. This allows you to minimize the cost of materials for the manufacture of devices and transfer heat most efficiently.

Intensification of heat exchange is always given great attention for any branch of industry and technology. High requirements are put forward to the structures of heat exchange equipment, which are related to the reduction of their mass, occupied volume, etc. A promising direction is the use of heat exchange surfaces with a large area, that is, developed, which is achieved by finning the primary surface. The optimal design of the surface development is determined by the values of the heat transfer coefficients from the hot coolant to the dividing wall of the heat exchanger tube and from the wall to the cold coolant. The most widely used are ribbed surfaces with knurled ribs, which are quite convenient in production and further operation

The purpose of the work is to determine the influence of such factors as the length of one finned tube, the bearing diameter of the finned tube and the finning ratio on the optimal structural performance of the compressed air heater based on the minimum length of the pipe system.

In terms of influence, the length of one tube is the most important, and the fin ratio is of secondary importance. With a significant increase in the finning ratio of the pipes, the total length of the pipes decreases.

The developed technique makes it possible to determine the optimal value of such a parameter as the total length of finned tubes. Also, on the basis of the obtained results, it is possible to develop an appropriate design of the heat exchanger with the accepted number of tubes transverse to the flow of the heat carrier that is heated. With the help of the developed methodology, it is possible to analyze the value of the length of the tubular system of the heat exchanger with various combinations of the above factors and to optimize its design in a fairly simple formulation.

### References

- [1] Klimov, R.O. (2013). *Teploenergetichni sistemi promislovikh pidpriemstv [Heat and power systems and industrial enterprises]*. Dniprodzerzhinsk: DDTU [in Ukraine].
- [2] Klimov, R.O. (2020). Optimizatsiya konstruktivnogo vypolneniya teploobmennykh apparatov [Optimization of the design of heat exchangers]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 1(36), P. 88–93 [in Ukraine].
- [3] Klimov, R.O., & Lusta, E.O. (2020). Mnogofaktornyye modeli proyektirovaniya teploobmennikov [Multi-factor heat exchanger design models]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, 2(37), P. 49–54 [in Ukraine].
- [4] Mankovsky, O.N. (1976). *Teploobmennaya apparatura khimicheskikh proizvodstv [Heat exchange equipment for chemical industries]*. L.: Khimiya [in Russian].
- [5] Kuntyshev, V.B. (1992). *Teplovoy i aerodinamicheskiy raschet orebrennykh teploobmennikov vozdušnogo ohlazhdeniya [Thermal and aerodynamic calculations of air-cooled finned heat exchangers]*. Spb.: Energoatomizdat [in Russian].
- [6] Hartman, K. (1977). *Planirovaniye eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov [Planning an experiment in the study of technological processes]*. M.: Mir [in Russian].

Надійшла до редколегії 22.03.2023