

DOI: 10.31319/2519-8106.1(52)2025.324578

UDC 628.32:004

**Averyanov Volodymyr**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of automobiles and transport and logistics systems

**Авер'янов В.С.**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем

ORCID: 0000-0001-6594-3964

e-mail: averyanov@ukr.net

**Guliaiev Kurulo**, postgraduate student, Department of automobiles and transport and logistics systems

**Гуляєв К.В.**, здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем

**Krutalevych Oleksiy**, undergraduate student, Department of automobiles and transport and logistics systems

**Круталевич О.В.**, здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем

e-mail: krytalevych@ukr.net

**Stasevych Oleg**, postgraduate student, Department of automobiles and transport and logistics systems

**Стасевич О.О.**, здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем

e-mail: stasevych.oleh@gmail.com

**Skrebkov Kostyantyn**, postgraduate student, Department of automobiles and transport and logistics systems

**Скребков К.О.**, здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем

**Komendarov Kostyantyn**, postgraduate student, Department of automobiles and transport and logistics systems

**Комендаров К.М.**, здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем

**Kiforuk Dmytro**, postgraduate student, Department of automobiles and transport and logistics systems

**Кіфорук Д.М.**, здобувач третього (доктора філософії) рівня вищої освіти, кафедра автомобілів та транспортно-логістичних систем

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

Дніпровський державний технічний університет

## DETERMINATION OF THE LENGTH OF CONTINUITY OF A LIQUID FLOW IN A FREE SWIRLING JET

## ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ОДНОРІДНОГО ПОТОКУ РІДИНИ ВІЛЬНОГО ЗАКРУЧЕНОГО СТРУМЕНЯ

*The chart of the unfolded free stream of liquid and technological chart of tubeless filtration of water technological environments is presented. Got mathematical dependence, allowing to define length of area of continuous stream of liquid in the opened environment, where it is expedient to place a filtration partition in devices for cleaning of liquid from mechanical admixtures.*

**Keywords:** *chamberless filtration, continuous flow, free swirl jet, mathematical model, experiment.*

У безкамерних фільтрувальних установках використовується енергія вільного струменя рідини. Для цього застосовуються всілякі конструкції форсунок, сопел та насадок. Незатопленим вільним струменем рідини називається струмінь рідини, оточений газовим середовищем, зокрема повітряним середовищем. На виході із сопла потік рідини є компактным струменем, який має великий кут розкриття. Геометричні параметри струменя впливають на продуктивність процесу очищення рідини від домішок та масляних забруднень.

Основними параметрами безкамерного фільтрування є: визначення кута розкриття струменя рідини; визначення ефективної відстані для розташування фільтрувальної перегородки від зрізу сопла; вплив кута нахилу сопла до перегородки в горизонтальній площині на продуктивність процесу безкамерного фільтрування; визначення швидкості струменя рідини перед фільтрувальною перегородкою; визначення ефективного часу експлуатації фільтрувальної перегородки і ступеня очищення.

Проведені дослідження показують, що в загальному випадку струмінь рідини може мати три характерні частини: компактний, частково роздроблений і розпорошений. У межах компактної частини зберігається циліндрична форма струменя рідини, причому суцільність руху рідини виявляється не порушеною. У межах частково роздробленої частини струменя рідини суцільність потоку порушується, причому струмінь рідини поступово розширюється. Нарешті, у межах розпорошеної частини струменя відбувається остаточний розпад потоку рідини окремі краплі.

Руйнування компактності струменя рідини протягом другої та третьої ділянок пояснюється її аерацією. Аерація струменя рідини обумовлюється спільним змішуванням між повітряним та водним середовищами. Тому необхідно визначити довжину компактної частини струменя рідини де доцільно встановлювати фільтрувальну перегородку в пристроях для очищення рідини від механічних домішок.

Представлена схема незатопленого вільного струменя рідини і технологічна схема безкамерного фільтрування водних технологічних середовищ. Отримана математична залежність, що дозволяє визначити довжину ділянки суцільного потоку рідини у відкритому середовищі, де доцільно розмістити фільтрувальну перегородку в пристроях для очищення рідини від механічних домішок.

**Ключові слова:** безкамерне фільтрування, однорідний потік, вільний закручений струмінь, математична модель, експеримент.

### Problem's Formulation

In chamberless filter units the energy of a free liquid stream is used. For this purpose, various designs of nozzles, jets and attachments are used. An unsubmerged free liquid stream is a liquid stream surrounded by a gaseous medium, in particular an air medium.

At the outlet of the nozzle, the liquid flow is a compact stream, which has a large opening angle. The geometric parameters of the stream affect the productivity of the process of cleaning the liquid from impurities and oil contaminants.

The following filtration parameters have not been studied:

- determining the opening angle of the liquid stream;
- determining the effective distance for the location of the filter partition from the nozzle exit;
- the effect of the angle of inclination of the nozzle to the partition in the horizontal plane on the productivity of the chamberless filtration process.
- determining the velocity of the liquid stream in front of the filter partition;
- determining the effective operating time of the filter partition and the degree of purification.

### Analysis of recent research and publications

In papers [1, 2] the authors consider the processes of wastewater filtration using a liquid jet, provide purification schemes and technological modes. However, the authors consider the jet as a whole, do not distinguish separate areas of jet grinding, which raises additional questions regarding the purification process.

After analyzing works [3, 4], where the authors highlight schemes for wastewater treatment using filtration plants with free liquid jets. However, these works did not take into account the twisting of the jet and the circulation of the liquid flow, which leads to its massive spraying.

In paper [5] the author presents new methods for increasing the efficiency of wastewater treatment processes, where coagulants and flocculants are widely used after mechanical treatment. Ensuring the efficiency of treatment is achieved by combining treatment methods. The disadvantages of these methods are the formation of new types of waste that are difficult to dispose of.

The authors in articles [6, 7] investigate the work of free liquid jets. They conduct experimental studies of the kinetic energy of the jet, the pressure of the jet on the surface of the filter partition. At the same time, the authors do not focus on the homogeneity of the flow and its swirling.

### Formulation of the study purpose

Let us consider a water jet of liquid of circular cross-section moving in air space. The conducted studies show that in general a liquid jet can have three characteristic parts: compact, partially fragmented and sprayed.

Within the compact part the cylindrical shape of the liquid jet is still preserved, and the continuity of the liquid movement is not broken. Within the partially fragmented part of the liquid jet the continuity of the flow is broken, and the liquid jet gradually expands. Finally, within the sprayed part of the jet the final disintegration of the liquid flow into individual droplets occurs.

The destruction of the compactness of the liquid jet during the second and third sections is explained by its aeration. Aeration of the liquid jet is caused by the joint mixing of air and water environments. Therefore it is necessary to determine the length of the compact part of the liquid jet, where it is advisable to install a filter partition in devices for cleaning liquid from mechanical impurities.

### Presenting main material

The length of the compact part of the liquid jet  $L$  affects the distance from the nozzle exit to the plane of the filter partition [8]. The length of the compact part of the liquid jet depends on the total liquid flow rate through the nozzle (Fig. 1)  $Q_{tl}$ ; on the ratio of liquid flow rates through the tangentially inserted branch pipe and through the nozzle  $Q_T/Q_n$  and the nozzle diameter  $d_c$ , liquid jet opening angle  $\alpha_c$ .

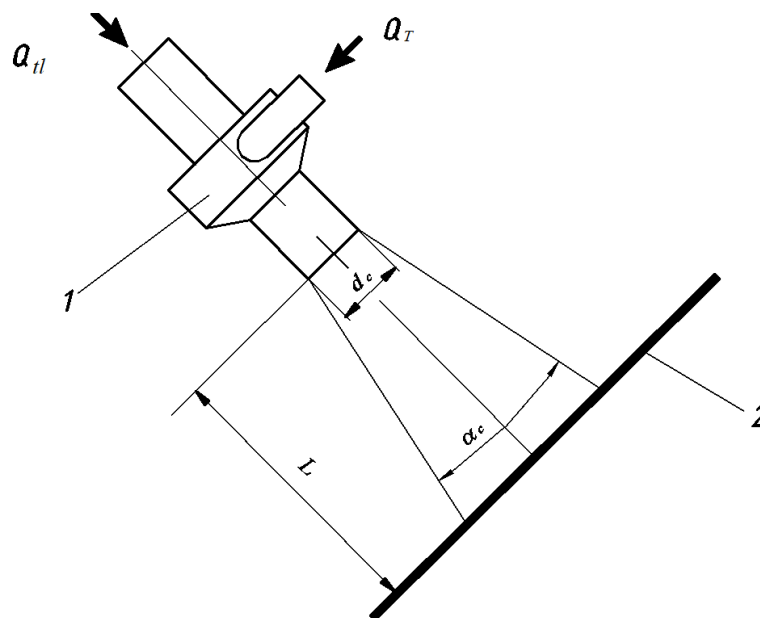


Fig. 1. Flow chart of the liquid filtration process: 1 — nozzle with a tangentially inserted branch pipe; 2 — filter partition

To construct a mathematical model for determining the length of the compact part of the liquid jet from the above factors in the form of a first-order polynomial, experimental design methods were used, namely, a full factorial experiment [9]. The levels of variation of the factors are presented in Tabl. 1.

Table 1. Levels of variation of the factors

Factors	Designation of factors	$x_i^*=-1,414$	$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = 1$	$x_i^*=1,414$
Total liquid consumption, $Q_{tl}$ , l/s	$x_1$	0,50	0,60	0,85	1,1	1,2
Fluid flow ratio, $Q_T/Q_{tl}$	$x_2$	0,12	0,17	0,3	0,43	0,48
Nozzle diameter, $d_c$ , m	$x_3$	0,016	0,017	0,02	0,023	0,024

The plan matrix and the obtained experimental results are presented in Tabl. 2.

Table 2. Plan matrix and the obtained experimental results

Experience No.	Coded values of factors in the experiment			
	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	$L$ , m
1	-1	1	1	0,042
2	1	1	1	0,063
3	1	1	-1	0,152
4	-1	1	-1	0,13
5	1	-1	1	0,07
6	-1	-1	1	0,06
7	1	-1	-1	0,2
8	-1	-1	-1	0,092
9	1,414	0	0	0,072
10	-1,414	0	0	0,108
11	0	0	1,414	0,068
12	0	0	-1,414	0,148
13	0	1,414	0	0,073
14	0	-1,414	0	0,09
15	0	0	0	0,08
16	0	0	0	0,082

In this case, the mathematical model for a complete three-factor experiment with a third-order interaction effect is [10]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (1)$$

The coefficients can be calculated using the formula:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}, j = 0, 1, 2, \dots, k, \quad (2)$$

where  $N$  — number of experiments;  $y_i$  — result of the  $i$ -th experiment.

The coefficients of the independent variables indicate the strength of the influence of the factors. The greater the numerical value of the coefficient, the greater the influence of the factor. If the coefficient has a plus sign, then with an increase in the value of the factor, the optimization parameter increases. The value of the coefficient corresponds to the contribution of this factor to the value of the optimization parameter when the factor moves from the zero level to the upper or lower level. To check the obtained estimates of the influence of factors on significance, based on the results of the second and eighth experiments, repeated twice, an estimate of the variance of observation errors was found [10].

In equation (1) the variable values  $x_1, x_2, x_3$  are coded quantities. For convenience of calculations, the coded quantities are replaced by natural ones:

$$x_1 = \frac{Q_{tl} - 0,85}{0,25} = 4 \cdot Q_{tl} - 3,4;$$

$$x_2 = \frac{d_c - 0,02}{0,003} = 333 \cdot d_c - 6,67; \quad (3)$$

$$x_3 = \frac{Q_T / Q_{tl} - 0,3}{0,13} = 7,69 \cdot Q_T / Q_{tl} - 2,31,$$

where  $Q_{tl}$  — total liquid flow rate, l/s;  $d_c$  — nozzle diameter, m;  $Q_T / Q_{tl}$  — ratio of liquid flow rates.

Having determined the coefficients for the formula (2) and coded values of the factors (3) and inserted them into equation (1), we obtain a mathematical relationship for determining the length of the compact part of the liquid jet from the above factors:

$$L = 0,01 - 0,12 \cdot Q_{tl} + 11,7 \cdot d_c + 0,3 \cdot Q_T / Q_{tl} - 2,81 \cdot Q_{tl} \cdot d_c + \\ + 0,01 \cdot Q_{tl} \cdot Q_T / Q_{tl} - 23,3 \cdot d_c \cdot Q_T / Q_{tl} + 10,3 \cdot Q_{tl} \cdot d_c \cdot Q_T / Q_{tl}. \quad (4)$$

Based on the results of experimental studies, graphical dependencies of the length of a continuous liquid flow on the nozzle diameter, on the total liquid flow rate, and on the ratio of the tangential and total liquid flow rate were constructed (Fig. 2—4).

The analysis of the experimental results and their mathematical processing show that with an increase in the total flow rate of liquid, the length of the solid part of the liquid jet decreases, but with an average feed, the length of the liquid jet fluctuates in one interval. With an increase in the nozzle diameter, the length of the solid part of the liquid jet decreases (Fig. 2). An increase in the nozzle diameter and the ratio of the tangential and total liquid flow rates have the same nature of dependence — a decrease in the length of the solid part of the liquid jet (Fig. 3). The ratio of the tangential and total liquid flow rates has a special influence, since in this case the opening angle of the liquid jet increases sharply. Accordingly, the length of the solid part of the liquid jet decreases sharply (Fig. 4).

### Conclusions

The resulting mathematical dependence allows us to determine the length of the section of continuity of the liquid flow in an open environment, where it is advisable to place a filter partition in devices for cleaning liquids from mechanical impurities.

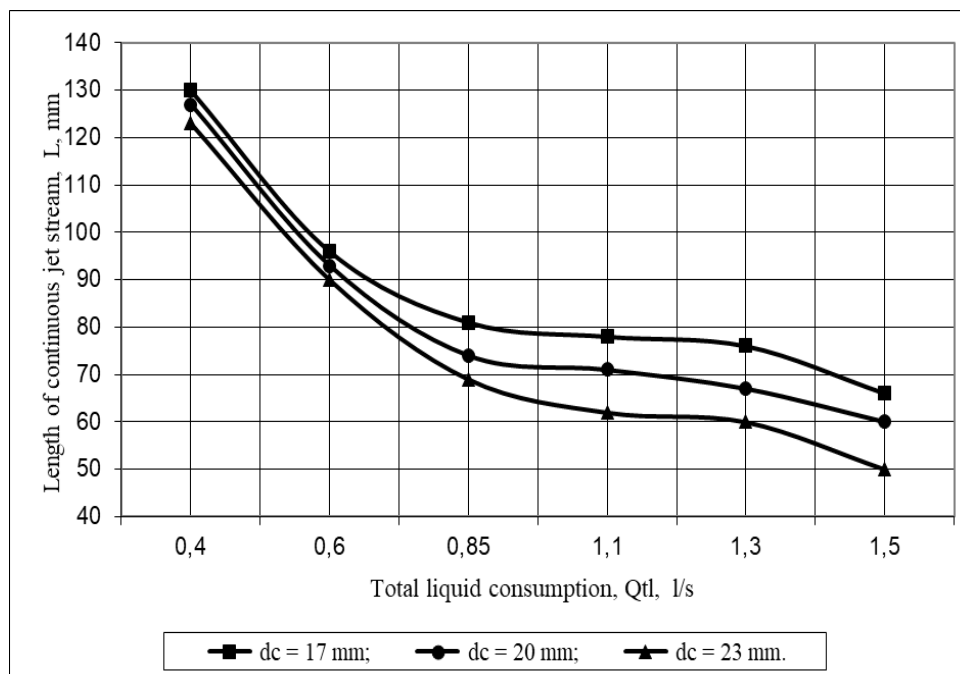


Fig. 2. Dependence of the length of a continuous fluid flow on the total fluid flow rate

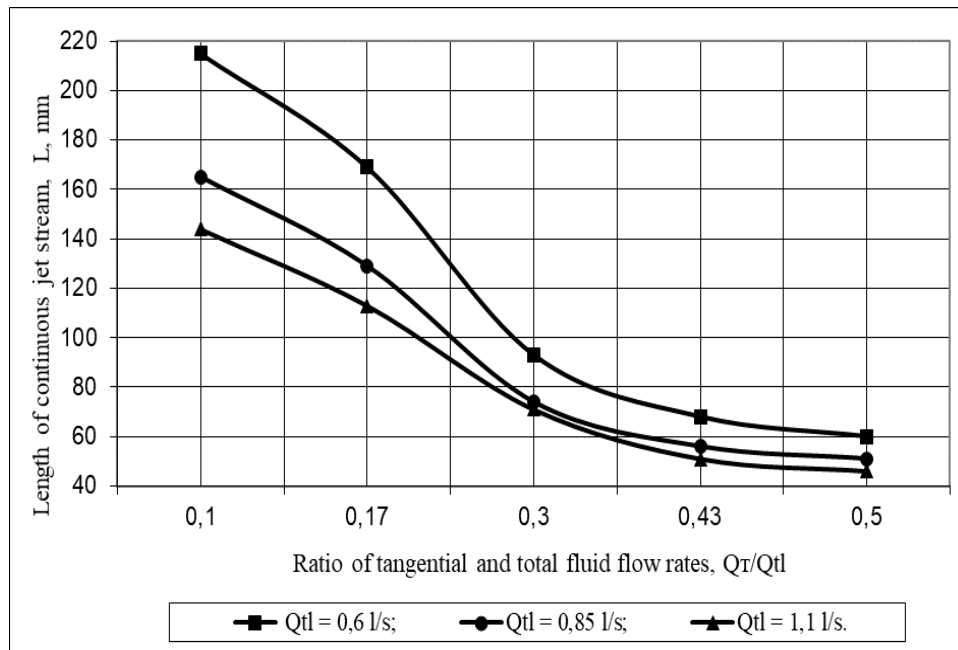


Fig. 3. Dependence of the length of a continuous fluid flow on the ratio of tangential and total fluid flow rates

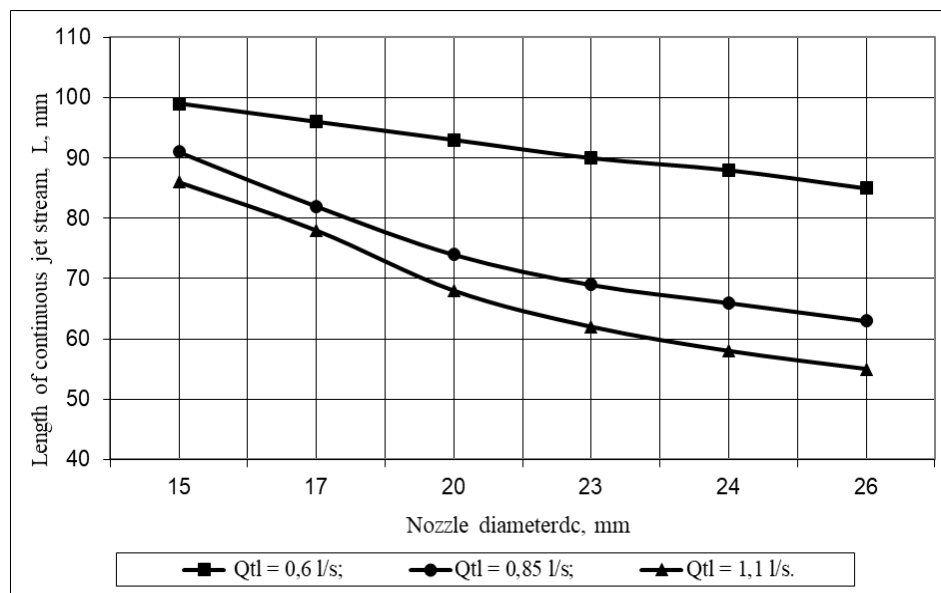


Fig. 4. Dependence of the length of a continuous liquid flow on the nozzle diameter

### References

- [1] Adler J., Jensen B., Wilson D. (2017). Flow pattern and cleaning performance of a stationary liquid jet operating at conditions relevant for industrial tank cleaning. *Food and Bioprocess Technology*. Vol. 101. 145–156.
- [2] Ronald M. Barron A., Balachandar R. (2011). An experimental and numerical study of water jet cleaning process. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 211. 610–618.
- [3] Hassanzadeh H., Wilson D., Frigaard I., Taghavi S. (2024). Turbulent impingement jet cleaning of thick viscoplastic layers. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Vol. 330. 105–110.

- [4] Tuck J., Alberini F., Ward D. (2019). Cleaning of thick films using liquid jets. *Energy Procedia*. Vol. 161. 93–99.
- [5] Shemyakin A.V. (2017). Modern methods of increasing the efficiency of the cleaning process [Sovremennyye sposoby povysheniya effektivnosti protsessa ochystky]. *International Scientific Journal*. Vol. 2. 95–99. [in Ukrainian].
- [6] Gordeev A.I., Savitsky Yu.V. (2014). Rheological model of a vibrating hydropulsator [Reolohichna model vibratsiinoho hidropulsatora]. *Mechanical engineering*. Vol. 1(79). 32–34. [in Ukrainian].
- [7] Stary A.R., Gordeev A.I. (2019). Cleaning and washing technology [Tekhnolohiia ochystky ta myky]. *Bulletin of KhNU. Technical Sciences*. Vol. 4. 7–14. [in Ukrainian].
- [8] Korobochka O.N., Oliinyk L.O., Averyanov V.S. (2009). Installation for filtering liquid [Ustanovka dlia filtruvannya ridyny. Patent Ukrainy na korysnu model № 39634]. Vol. 5. [in Ukrainian].
- [9] Sedov L.I. (2014). *Mechanics of a continuous medium [Mekhanika sutsilnoho seredovyscha]*. Kyiv: Nedra. [in Ukrainian].
- [10] Volokita A.M., Selivanov V.L. (2022). *Fundamentals of the Theory of Experimental Design [Osnovy teorii planuvannya eksperymentu. Navchalnyi posibnyk]*. Kyiv : KPI. [in Ukrainian].

#### Список використаної літератури

1. Adler J., Jensen B., Wilson D. Flow pattern and cleaning performance of a stationary liquid jet operating at conditions relevant for industrial tank cleaning. *Food and Bioprocess Processing*. 2017. Vol. 101. P. 145–156.
2. Ronald M. Barron A., Balachandar R. An experimental and numerical study of water jet cleaning process. 2011. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 211. P. 610–618.
3. Hassanzadeh H., Wilson D., Frigaard I., Taghavi S. Turbulent impingement jet cleaning of thick viscoplastic layers. 2024. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Vol. 330. P. 105–110.
4. Tuck J., Alberini F., Ward D. Cleaning of thick films using liquid jets. 2019. *Energy Procedia*. Vol. 161. P. 93–99.
5. Шемякин А.В. Современные способы повышения эффективности процесса очистки. *Международный научный журнал*. 2017. № 2. С. 95–99.
6. Гордеев А.И., Савицкий Ю.В. Реологична модель вібраційного гідропульсатора. *Машинобудування*. 2014. №1(79). С. 32–34.
7. Старий А.Р., Гордеев А.І. Технологія очищення та мийки. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2019. № 4. С. 7–14.
8. Коробочка О.М., Олійник Л.О., Авер'янов В.С. Установка для фільтрування рідини. Патент України на корисну модель № 39634 10.03.2009. Бюл. № 5/2009.
9. Седов Л.И. Механіка суцільного середовища. К.: Недра, 2014. 528 с.
10. Волокита А.М., Селіванов В.Л. Основи теорії планування експерименту. Навчальний посібник. Київ : КПІ, 2022. 41 с.

Надійшла до редколегії 06.03.2025