

УДК 622.53:681.518./62.83

**Яжук Д. В.**

магістр агроінженерії,

асистент кафедри тракторів, автомобілів та енергетичних засобів,

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

Кам'янець-Подільський, Україна

**E-mail:** yazhuk@pdatu.edu.ua**ORCID:** 0009-0008-3174-6864

## ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПІД ЧАС РОБОТИ НАСОСНИХ УСТАНОВОК В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ УКРАЇНИ ШЛЯХОМ ВВЕДЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ДОБАВОК

### Анотація

У статті розглянуто вплив полімерних добавок на способи зниження витрат напору при подоланні гідравлічних опорів у системах роботи насосних установок та їх режиму для потреб агропромислового комплексу. Представлено результати експериментальних досліджень роботи на промисловому стаціонарному консольному центробіжному насосі марки 2К-6 шляхом закриття вентилу на напірному трубопроводі і запуску насосного агрегату в роботу відповідно до і після введення в воду полімерних добавок. Під час роботи насосів у воду додавали високомолекулярний полімер дозою 0,01%. Після виходу насосної установки на нормальний режим роботи, змінюючи ступінь відкриття вентилу, ми встановлювали по п'ять довільних подач насосом води з домішками і без них, починаючи з нульової і доводячи подачу до максимального значення (повне відкриття вентилу). Тобто було виконано десять дослідів. При кожному варіанті подачі насоса було взято показання вакуумметра, манометра і амперметра (останнього для визначення споживаної потужності), по трикутному мірному водозливу було відібрано показання величини подачі в кожному досліді. Усі показники внесено у відповідні таблиці дослідів.

Порівняння робочих характеристик насосів, що перекачують воду з додаванням ПАА, з паспортними характеристиками показало поліпшення характеристик насосів. Зокрема, подача насоса  $Q_n$  збільшилася приблизно на 30%, а коефіцієнт корисної дії на 10%.

Аналіз досліджень дає можливість зробити висновок про те, що використання полімерних добавок підвищує ефективність роботи насосних установок і значно знижує їхні енерговитрати. Крім того, застосування полімерів дає змогу отримувати задані робочі параметри насоса, не збільшуючи діаметра трубопроводу.

**Ключові слова:** гідравлічні опори, втрати напору, насосна установка, турбулентна течія, поліакриламід, полімерна добавка, коефіцієнт тертя.

**Вступ.** Для потреб агропромислового комплексу, щоб переміщувати трубами різні рідини, гази, суміші рідин і твердих частинок на значні відстані, використовують гідравлічні системи, головним елементом яких є насосні установки [8].

Насосні установки та трубопроводи – найважливіші складові частини будь-якого технологічного процесу [8]. Їх використовують: у виробничих процесах нафтової та газової промисловості, пов'язаних із транспортуванням нафти й газу від місця видобутку до місця перероблення і далі до споживача; для переміщення глинистих і цементних розчинів у будівельній, гірничій, хімічній промисловості, в агропромисловому секторі; у системах промислового водопостачання і постачання питною водою міст і селищ, водовідведення, пожежогасіння тощо. Робота таких систем потребує величезних енергетичних витрат [8].

Насосно-силове обладнання, яке використовується на перекачувальних станціях, може мати різні типи і навіть при однакових марках відрізнятися за своїми технічними характеристиками на 3–5% [8].

Найвні насоси не можуть забезпечити роботу при максимальних ККД для всього діапазону необхідних подач і напорів [8]. Для забезпечення заданих параметрів перекачування необхідно регулювати роботу кожного насосного агрегату з мінімізацією витрат, а також мати аналітичні залежності цих параметрів від подачі насоса. Стандартні насосні установки включають насос, електродвигун, трубопроводи (напірні та всмоктувальні), прилади контролю і регулювання [8]. Споживаючи енергію від електродвигуна, насос віддає її рідині для транспортування трубами. Рідина, що рухається трубами, втрачає отриману енергію на подолання гідравлічних опорів, тобто на втрати напору, які бувають двох видів – втрати на тертя і місцеві втрати [8]. Коефіцієнт корисної дії та енергетичні витрати насосної установки безпосередньо пов'язані з втратами напору рідини, що рухається по трубах і в насосі [8].

Дослідження низки авторів засвідчили, що застосування полімерних добавок ефективно під час руху не тільки води, а й нафтопродуктів як малої, так і великої в'язкості [8; 4; 5]. Нині полімерні добавки використовують для збільшення швидкості перекачування трубами при турбулентному режимі нафтопродуктів, емульсій, водних суспензій, знижуючи енерговитрати, а отже, і потужність силових установок під час нафтовидобутку і газовидобутку, збільшуючи швидкість проходження порід під час буріння свердловин [8].

Низка авторів [8] експериментально довела, що для зниження втрат напору в магістральних нафтопроводах у якості нафторозчинних полімерів можливе застосування добавок асфальгенів і смол – продуктів, що містяться в нафтових залишках після переробки нафти. Зокрема, проводилися масштабні дослідження щодо впливу полімерних добавок на зниження гідравлічних опорів у трубах і пожежних шлангах (зокрема, вони додавали полімер у всмоктувальну лінію насоса, тим самим знижуючи гідравлічні втрати і в самому насосі) [8].

Нині у зв'язку зі зростанням цін на електроенергію все актуальнішим стає питання підвищення ефективності роботи насосів і трубопроводів з метою зниження експлуатаційних витрат на переміщення нафти, газу, нафтопродуктів, води тощо [8].

Мета роботи – дослідження впливу полімерної добавки ПАА на роботу відцентрових насосів 2К-6 і К20/18 та зниження енергозатрат під час роботи насосних установок для потреб агропромисловості.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Дослідження проводилися на промисловому стаціонарному консольному центробіжному насосі марки 2К-6 шляхом закриття вентиля на напірному трубопроводі і запуску насосного агрегату в роботу відповідно до і після введення в воду полімерних добавок. Під час роботи насосів у воду додавали високомолекулярний полімер дозою 0,01%.

Статистичну обробку отриманих результатів проводили за допомогою стандартного пакету Statistica у програмі Microsoft Excel 2013 і Statsf. Результати дослідження оброблялися на кафедрі тракторів, автомобілів та енергетичних засобів Закладу вищої освіти «Подільський державний університет».

Після виходу насосної установки на нормальний режим роботи, змінюючи ступінь відкриття вентиля, ми встановлювали по п'ять довільних подач насосом води з домішками і без них, починаючи з нульової і доводячи подачу до максимального значення (повне відкриття вентиля). Тобто було виконано десять дослідів. При кожному варіанті подачі насоса було взято показання вакуумметра (рис. 1), манометра і амперметра (останнього для визначення споживаної потужності), по трикутному мірному водозливу було відібрано показання величини подачі в кожному досліді. Усі показники внесено у відповідні таблиці дослідів.

Відомо, що втрати напору на подолання сил тертя можуть бути визначені для труб круглого перерізу за рівнянням Дарсі (1):

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору тертя;  $l$  – довжина трубопроводу;  $d$  – внутрішній діаметр труби;  $v$  – середня швидкість потоку.

Втрати напору на подолання місцевих гідравлічних опорів визначають за рівнянням Вейсбаха (2):

$$h_{\text{м}} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (2)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнти місцевого опору.

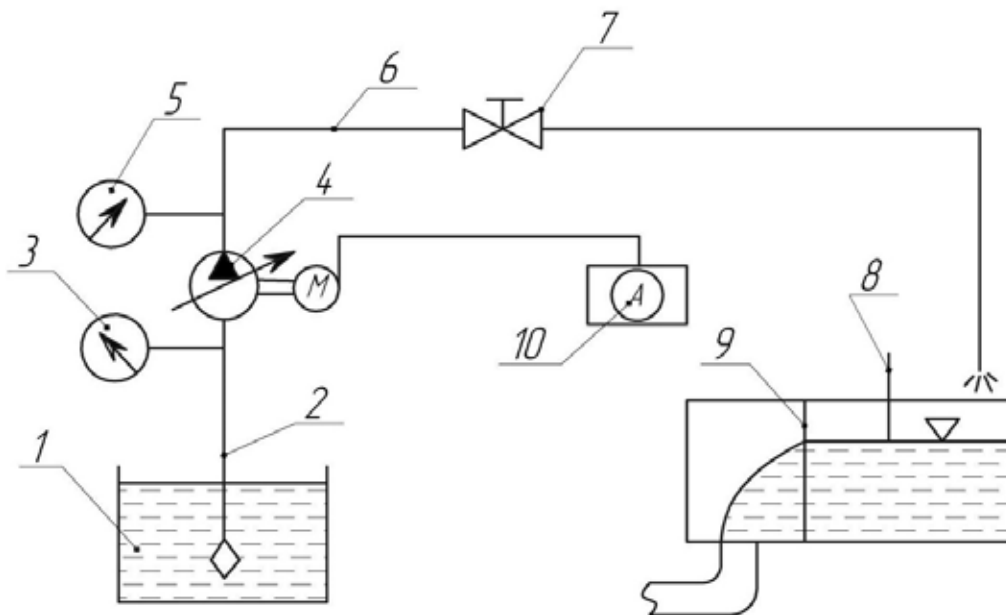


Рис. 1. Схема установки для випробувань насоса 2К-6: 1 – резервуар для води; 2 – усмоктувальний трубопровід; 3 – вакуумметр; 4 – насос, який випробовується; 5 – манометр; 6 – напірний трубопровід; 7 – вентиль; 8 – мірна голка; 9 – трикутний мірний водозлив; 10 – амперметр

До місцевих гідравлічних опорів відносять крани, вентиля, засувки, клапани, фільтри, коліна, ділянки звуження трубопроводу і його відвідного розширення (конфузор і дифузор) тощо [9], що є причиною додаткових втрат напору (енергії) в трубопроводі, тобто місцевих втрат.

Отже, повні втрати напору в трубопроводі складатимуть (3):

$$h_{\text{полн}} = h_{\text{тр}} + \Sigma h_{\text{м}}, \quad (3)$$

Середня швидкість руху рідини в трубі (4):

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (4)$$

де  $Q$  – витрата рідини в трубі, що дорівнює подачі насоса;  $Q_n$  – кількість рідини, що подається насосом у трубопровод за одиницю часу.

Найважливішим завданням під час проектування та експлуатації гідравлічних систем і підвищення ефективності їхньої роботи є зниження втрат напору рухомої рідини.

Рівняння (1), (2), (4) показують, що для зменшення втрат напору, а отже, витрат енергії насосної установки найпростіший спосіб – це збільшення діаметра труби  $d$ , що веде до зменшення швидкості руху рідини в трубі  $v$ .

Однак збільшення діаметра труби може суттєво збільшити вартість гідравлічної системи в цілому. Зниження втрат напору в трубах можна отримати, змінюючи вид і зменшуючи кількість місцевих гідравлічних опорів або використовуючи труби малої шорсткості тощо, але ці способи не дають великого ефекту щодо зниження втрат напору.

Зменшення енергетичних витрат будь-якої системи, зокрема гідравлічної системи типу «насос – трубопровід», веде до збільшення коефіцієнта корисної дії системи.

Коефіцієнт корисної дії насоса (5):

$$\eta_n = \frac{N_n}{N_{\text{вт}}}, \quad (5)$$

де  $N_{\text{вт}}$  – споживана насосом потужність (близька до потужності електродвигуна);  $N_n$  – корисна потужність насоса.

Корисна потужність насоса дорівнює (6):

$$N_n = \rho g Q_n H_n = p_n Q_n, \quad (6)$$

де  $H_n$  – напір насоса;  $Q_n$  – подача насоса;  $p_n$  – тиск насоса;  $\rho$  – густина рідини, що перекачується.

Робота насосної установки та її енергетичні показники оцінюються за такими характеристиками насоса:

$$H_n = f(Q_n); \quad N_{\text{пот}} = f(Q_n); \quad \eta_n = f(Q_n).$$

На рис. 2 представлено робочі характеристики  $H_n = f(Q_n)$  і  $\eta_n = f(Q_n)$  відцентрового насоса марки 2К-6 і характеристики насоса після додавання поліакриламід (ПАА).

Енергетичні параметри насоса  $H$ ,  $\eta_n$ ,  $Q_n$ , який подає рідину в трубопровід, визначають *режимною* точкою (точкою А на рис. 2), тобто точкою перетину головної характеристики насоса  $H_n = f(Q_n)$  з характеристикою трубопроводу  $H_{\text{тр}} = f(Q)$ . *Режимна*, або робоча, точка насоса – це точка, що відповідає матеріальній та енергетичній



Рис. 2. Характеристики насоса 2К-6:  $H_{\text{тр}1} = f(Q)$  – характеристика трубопроводу, що відповідає діаметру трубопроводу  $d_1$ ;  $H_{\text{тр}2} = f(Q)$  – характеристика трубопроводу, що відповідає діаметру  $d_2 > d_1$

рівновазі системи. Використовуючи вищезазначені способи зниження втрат напору в системі, можна змінити характеристику трубопроводу таким чином, щоб насос працював з більшим коефіцієнтом корисної дії (ККД).

Протягом останніх десятиліть для зниження втрат напору в гідравлічних системах використовують метод, спрямований на зменшення коефіцієнта тертя  $\lambda$  (рівняння (7), що залежить у загальному випадку від числа Рейнольдса  $Re$  і відносної шорсткості труби [9]).

У функціональному вигляді (7):

$$\lambda = f\left(Re; \frac{\Delta_s}{d}\right), \quad (7)$$

де  $\Delta_s$  – еквівалентна шорсткість внутрішньої поверхні труби.

Зараз для зменшення коефіцієнта тертя в системах із турбулентним режимом руху рідини успішно використовують полімерні добавки, що знижують гідравлічні опори завдяки гасінню турбулентності в прикордонному шарі вздовж стінок трубопроводу [9]. Також як добавку до води, що перекачується, використовували розчини карбоксиметилцелюлози (КМЦ). У результаті проведених експериментів за різних чисел Рейнольдса коефіцієнт тертя  $\lambda$  було знижено на 15–20%.

Дещо пізніше було розроблено першу методику визначення оптимальної дози полімеру у воді для значного зниження втрат напору в трубах [3].

Під час руху трубами води з добавками полімерів коефіцієнт тертя  $\lambda$  за турбулентного режиму руху рідини може бути визначений за рівнянням (8) [4]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \left( \frac{2,8v_{\text{пор}}^*}{v\sqrt{\lambda}} \right)^{\beta/5,75} \times \left( \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta_s}{3,7d} \right) \right], \quad (8)$$

де  $v^*$  – порогова динамічна швидкість, що залежить від виду полімеру, після досягнення якої починається зниження втрат напору;  $v$  – середня швидкість руху рідини в трубі;  $\beta$  – коефіцієнт, що залежить від виду полімеру та його концентрації.

Критичні значення динамічної швидкості (9):

$$v_{\text{пор}}^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}, \quad (9)$$

з яких починається інтенсивне руйнування макромолекул деяких полімерів (0,05÷0,15) м/с.

Для поліакриламиду (ПАА) рекомендується приймати  $v^* = 0,05$  м/с, а коефіцієнт  $\beta$  знаходити за емпіричною формулою (10):

$$\beta = 1000 C, \quad (10)$$

якщо  $C$  – об'ємна концентрація поліакриламиду – перебуває в межах  $0,005\% < C < 0,012\%$ .

У деяких випадках за концентрації ПАА близько 0,01% втрати напору було знижено на 70%. За відсутності полімерної добавки ( $C = 0$ ;  $\beta = 0$ ) рівняння (9) перетворюється на відому формулу гідравліки, формулу Кольбука – Вайта [4] (11):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{\Delta_s}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right), \quad (11)$$

Експериментально встановлено, що незначний вміст у воді лінійних високомолекулярних полімерів – поліакриламиду (ПАА) або поліетиленоксиду (ПЕО) – в умовах турбулентного режиму руху води веде до зниження гідравлічних опорів тертя та збільшення пропускної здатності труби.

**Висновки.** Порівняння робочих характеристик насосів, що перекачують воду із додаванням ПАА, з паспортними характеристиками показало поліпшення характеристик насосів. На малюнку (2) представлено паспортні характеристики насоса, а також отримані в процесі випробувань при введенні у воду ПАА. Порівняння цих характеристик показало, що подача насоса  $Q_n$  збільшилася приблизно на 30%, а коефіцієнт корисної дії на 10%.

Таким чином, аналіз досліджень дає можливість зробити висновок про те, що використання полімерних добавок підвищує ефективність роботи насосних установок і значно знижує їхні енерговитрати. Крім того, застосування полімерів дає змогу отримувати задані робочі параметри насоса, не збільшуючи діаметра трубопроводу.

На наступному етапі досліджень ми плануємо оцінити вплив різних концентрацій використовуваного полімеру на оптимальний режим роботи насоса.

#### Список використаних джерел

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. 2021. URL: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245239564&cat\\_id=245239555](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555).
2. Оринчак М.І., Оринчак М.М., Бейзик О.С. Буровий розчин для якісного вторинного розкриття продуктивних горизонтів. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2019. № 1 (42). Р. 25–32. URL: <https://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/79>.

3. Н.Г. Шевченко, О.Л. Шудрик, О.С. Коваль, О.В. Дорошенко. Врахування реологічних властивостей водонафтової емульсії на робочі характеристики відцентрового насоса. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series "Hydraulic machines and hydraulic units"*. 2018. № 17 (1293). P. 58–65.
4. Berdugo-Clavijo C., Scheffer G., Sen A. Biodegradation of Polymers Used in Oil and Gas Operations: Towards Enzyme Biotechnology Development and Field Application. *Polymers*. 2022. Vol. 14, issue 9. P. 1871. Doi: 10.3390/polym14091871.
5. Bicerano J. Applications of Polymers and Composites in the Oil and Natural Gas Exploration and Production Industry. 2020. URL: <https://polymerexpert.biz/industries/184-oil-gas-exploration-production>.
6. Gavrilov A.A., Rudyak V.Ya. Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2021. Vol. 227. P. 45–55. Doi: 10.1016/j.jnnfm.2015.11.006.
7. Khan S., Yusuf M., Sardar N. Studies on rheological behavior of Xanthan Gum solutions in presence of additives. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 2, issue 5. P. 1–7.
8. Mohammadi A. Analysis of non-Newtonian behavior of crude oil: experimental study and numerical modeling using computational fluid dynamics (CFD) technique. URL: <https://researchspace.ukzn.ac.za/handle/10413/18907>.
9. Shudryk A. Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series "Hydraulic machines and hydraulic units"*. 2016. № 20 (1192). P. 90–93.
10. Zhong L., Oostrom M., Truex M.J. Rheological behavior of xanthan gum solution related to shear thinning fluid delivery for subsurface remediation. *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Vol. 244–245. P. 160–170. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.028/

**Yazhuk D. V.**

*Master of Agroengineering,  
Assistant at the Department of the Tractors, Cars and Power Tools,  
Higher Educational Institution "Podillia State University"  
Kamianets-Podilskiyi, Ukraine  
E-mail: yojikdmutro@gmail.com  
ORCID: 0009-0008-3174-6864*

## THE ACTION OF POLYMER ADDITIVES ON THE REDUCTION OF POWER CONSUMPTION OF PUMP FITTING WHEN OPERATING.

### Abstract

*The impact of polymer additives on methods of reducing head loss when overcoming hydraulic resistances in pumping systems and their regime for the needs of the agro-industrial complex is considered. The results of experimental studies of work on an industrial stationary cantilever centrifugal pump, brand 2K-6, by closing the valve on the pressure pipeline and starting the pump unit in operation, according to and after the introduction of polymer additives into the water, are presented. During the operation of the pumps, a high molecular weight polymer was added to the water at a dose of 0.01%. After the pump set went into normal operation mode, changing the degree of opening of the valve, five arbitrary water pumps with and without impurities were set, starting from zero and bringing the supply to the maximum value, that is, ten experiments were performed. For each variant of the pump supply, the readings of the vacuum gauge, manometer and ammeter were taken, the readings of the supply value in each experiment were selected from the triangular measuring spillway and all the readings were entered in the relevant tables of experiments.*

*A comparison of the operating characteristics of pumps pumping water with the addition of PAA with the passport characteristics showed an improvement in the characteristics of the pumps, namely, the pump delivery  $Q_n$  increased by approximately 30%, and the efficiency increased by 10%.*

*The analysis of research makes it possible to conclude that the use of polymer additives increases the efficiency of pump installations and significantly reduces their energy consumption. In addition, the use of polymers makes it possible to obtain the specified operating parameters of the pump without increasing the diameter of the pipeline.*

**Key words:** *hydraulics resistance, pressure losses, pumping fitting, turbulent flow, polyacrylamide, polymer additive, constant of frictions.*

### References

1. Enerhetychna stratehiya Ukrainy na period do 2035 roku (2021) [Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035]. Retrieved from: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245239564&cat\\_id=245239555](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555) [in Ukrainian].
2. Orynychak, M.I., Orynychak, M.M., & Beyzyk, O.S. (2019) Burovyi rozchyn dlya yakisnoho vtorynnoho rozkryttya produktivnykh horyzontiv [Drilling solution to qualitatively secondary open the productive horizons]. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, no. 1 (42), pp. 25–32. [in Ukrainian].
3. Shevchenko, N.H., Shudryk, O.L., Koval', O.S., & Doroshenko, O.V. (2018) Vrahuvannya reolohichnykh vlastyvostey vodonaftovoyi emul'siyi na robochi kharakterystyky vidtsentrovoho nasosa [Accounting rheology water-oil emulsion to performance of centrifugal pumps]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. 17 (1293). Kharkiv, NTU "KhPI" Publ. pp. 58–65. [in Ukrainian].
4. Berdugo-Clavijo, C., Scheffer, G., Sen, A., & Gieg, L.M. (2022) Biodegradation of Polymers Used in Oil and Gas Operations: Towards Enzyme Biotechnology Development and Field Application. *Polymers*, vol. 14, issue 9, p. 1871. doi: 10.3390/polym14091871
5. Bicerano, J. (2020) Applications of Polymers and Composites in the Oil and Natural Gas Exploration and Production Industry. Retrieved from: <https://polymerexpert.biz/industries/184-oil-gas-exploration-production>.

6. Gavrilov, A.A., & Rudyak, V.Y. (2021) Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 227, pp. 45–55. doi: 10.1016/j.jnnfm.11.006 [in Ukrainian].
7. Khan, S., Yusuf, M., & Sardar, N. (2021) Studies on rheological behavior of Xanthan Gum solutions in presence of additives. *Petroleum & Petrochemical Engineering Journal*, vol. 2, issue 5, pp. 1–7.
8. Mohammadi, A. Analysis of non-Newtonian behavior of crude oil: experimental study and numerical modeling using computational fluid dynamics (CFD) technique. Retrieved from: <https://researchspace.ukzn.ac.za/handle/10413/18907>.
9. Shudryk, A. (2016) Using open software application packages for simulation of viscous incompressible fluid. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., no. 20 (1192), pp. 90–93. [in Ukrainian].
10. Zhong, L., Oostrom, M., & Truex, M. J. (2013) Rheological behavior of xanthan gum solution related to shear thinning fluid delivery for subsurface remediation. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 244–245, pp. 160–170. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.028.