

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

ECOLOGICAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 537.84

DOI 10.20535/1813-5420.3.2023.289724

О.М. Терентьєв¹, д-р техн. наук, професор, ORCID 0000-0003-2523-2804

М.В. Кудільчак¹, студент, ORCID 0000-0003-1009-7304

Н.І. Жукова¹, канд. техн. наук ORCID 0000-0002-4215-6981

С.В. Кудільчак¹, студент, ORCID 0000-0002-9978-5121

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЧИЩЕННЯ РІДИНИ ВІД ДОМІШОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВПЛИВОМ

Важливість очищення рідин полягає в зниженні концентрації забруднюючих речовин в основному потоці під час її використання. У цій роботі проаналізовано актуальність досліджень очищення рідини згідно наявних законодавчих актів. Проведено аналіз актуальних фізичних та хімічних способів очищення рідини. Описано створення робочої камери групування (РКГ) домішок для очищення рідини. Результатом досягнуто електромагнітним впливом на заряджені домішки. Сформовано наукову новизну дослідження створенням параболоїду обертання домішок. Принцип дії системи очищення продемонстровано на прикладі групування домішок масла та води. Результати досліджень показують можливість очищення рідини за допомогою керування траєкторії руху домішок. В роботі використані рівняння Діні (італ. Ulisse Dini) для опису математичної моделі групування домішок. Створено модель траєкторії руху домішок в оболонці LabVIEW. Перевірено можливість доочищення рідини методом електромагнітного групування та подальшого виведення домішок з потоку. Дослідження полягає у встановленні котушок індуктивності на зовнішній поверхні камери групування домішок. Визначено траєкторію руху домішок в магнітному полі. Електромагнітний вплив на заряджені домішки змінює їх траєкторію руху та змушує домішки рухатись за радіусом Лармора. При зростанні величини електромагнітного поля швидкість руху домішок збільшується, а радіус руху домішок зменшується. Доведено, що домішки з меншою густиною краще концентруються в центрі РКГ. Обрано параметри котушок для створення електромагнітного поля. На макеті відтворено модель обертання домішок масла у воді. Перевірено зміну питомої провідності водного середовища при зростанні індукції магнітного поля. На першому етапі запропоновано конструкцію стенду доочищення рідини методом електромагнітного групування домішок. Надано практичні рекомендації для досягнення ефективності електромагнітного способу очищення рідини та її повторного використання.

Ключові слова: доочищення рідини, домішки, магнітне поле, сила Лоренца, параболоїд обертання, видалення домішок.

Вступ. Завдання раціонального використання водних ресурсів та зменшення їх втрат є актуальним [1]. Раціональне використання водних ресурсів та ефективне очищення забруднених стічних вод має важливе народногосподарське значення. Водним кодексом України [2] визначено поняття "зворотна вода" — це вода, що повертається за допомогою технічних споруд і засобів з господарської ланки кругообігу води в його природні ланки у вигляді стічної, шахтної, кар'єрної чи дренажної води. Згідно п. 18 Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами, встановлені нормативи гранично допустимих скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти [3]. Відповідно до цих документів, тема очищення води є актуальною.

Корпорація Exxon-Mobil, встановила, що один літр відпрацьованої рідини може зіпсувати мільйон літрів питної води [4]. Це аналогічно забрудненню океанів нафтопродуктами, спричиненими техногенними катастрофами та викидами, що є глобальною проблемою [5]. Нафта та нафтопродукти негативно впливають на морські біоценози – сукупність живих істот у межах однієї екосистеми. Склад нафти токсичний [6]. Відомі методи очищення води від нафтових плівок не можуть повністю усунути дане завдання.

Відомі фізичні та хімічні способи доочищення рідини. Фізичні способи очищення і доочищення рідини здійснюються за допомогою зовнішніх силових полів, без додавання хімічних речовин. Хімічні способи очищення полягають у використанні реагентів та складних технічних установок [7]. В Україні прийнятий закон «Питна вода України на 2022-2026 роки», яка визначає необхідність очищення як

пріоритетний напрямок наукової діяльності [8]. У передових країн це питання є важливим для побутових цілей та промисловості [9]. Кількість домішок у рідині може бути різною за типом та структурою. Для розробки способів очищення домішки об'єднують в групи за певними ознаками. За допомогою механічних способів очищення з рідини виводять нерозчинені грубо дисперсні домішки, мінерального та органічного походження. Актуальними способами очищення є: проціджування, відстоювання, фільтрування, дистиляція, мікрофільтрація. Недоліками вищевказаних методів є енергоємність, час здійснення процесу та складність видалення речовин. Після аналізу відомих вітчизняних та закордонних систем очищення рідини сформульована мета дійсного дослідження.

Метою роботи є доочищення рідини управлінням траєкторією руху домішок для їх подальшого виведення із потоку і повторного використання рідини у технологічному процесі. До **завдань** віднесені:

1. Аналіз та створення моделі групування домішок з подальшим їх виведенням з потоку.
2. Вибір базової математичної моделі групування та видалення домішок.
3. Створення макету доочищення рідини та видалення домішок з основного потоку.
4. Підготувати висновки і практичні рекомендації з видалення домішок з основного потоку.

Наукова новизна полягає у тому, що:

– підтверджено зростання індукції електромагнітного поля має експоненціальний характер при іонізації забруднюючих домішок викликаючи зміну питомої електропровідності водного середовища;

– встановлено, що закономірності взаємодії домішок забруднюючих водне середовище електромагнітним полем визначаються лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням другого порядку з постійними коефіцієнтами і спеціальною правою частиною у вигляді багаточлена;

– доведено, що залежність амплітуди коливаний домішок забруднюючих водне середовище від індукції електромагнітного поля апроксимується за гіперболічним законом, а від витрати рідини в гідросистемі лінійна.

Для дослідження розроблено робочу камеру групування домішок (РКГ). За допомогою РКГ домішки мають можливість окремого введення з основного потоку рідини. На рисунку 1 показано камеру групування домішок

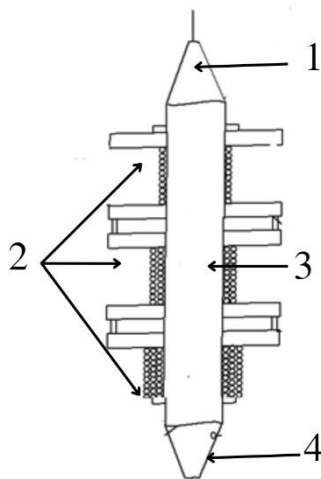


Рисунок 1. *Робоча камера групування домішок: 1 – вузол вводу рідини; 2 – соленоїди, 3 – камера з котушками для групування домішок; 4 – днище РКГ з центральним отвором видалення домішок з рідини.*

При створенні РКГ на її зовнішній поверхні встановлено певну кількість котушок індуктивності. Перша верхня котушка намотана дротом більшого перерізу з найменшою кількістю витків. Індуктивність наступних котушок збільшується за рахунок збільшення кількості витків та зменшення діаметру дроту, яким їх намотували. Таке розміщення котушок на зовнішній поверхні РКГ створює вплив сили Лоренца на заряджені частинки і змушує їх рухатись по радіусу Лармора [10] Радіус орбітального руху домішок зменшується. Поступове зростання індуктивності котушок і розміщення їх зовні робочої камери забезпечує фокусування домішок у параболоїд обертання, їх траєкторія наближається до вигляду конічної спіралі. Крім того, на вході у РКГ формується більший діаметр параболоїда обертання 100 мм. У нижній частині РКГ на виході системи утворено менший діаметр параболоїда (15-20) мм. Перша, верхня котушка з внутрішнім діаметром 100 мм намотана дротом ПЕВ-1 перерізом 1,5 мм² з кількістю витків – 150. Друга котушка внутрішнім діаметром 95 мм намотана дротом ПЕВ-1 перерізом 1 мм² з кількістю витків – 300. Третя котушка внутрішнім діаметром 90 мм намотана дротом ПЕВ-1 перерізом 0,35 мм² з кількістю витків – 600. Висота робочої частини РКГ – 305 мм. Об'єм забрудненої рідини в РКГ дорівнює 2,39 дм³. Радіус

орбітального руху домішок зменшується при зростанні індуктивності котушок і є мінімальним біля отвору у днищі для видалення домішок.

Вибір математичної моделі групування домішок рідини

У роботі розглянуто теоретичні підходи з використанням рівнянь Діні, для створення моделі групування домішок. Подібність між виразами та чорними дірками виявляється в тому, що щось, що опинилося поблизу цих об'єктів, залучається до них і ніколи не повертається і деякий час утримується в середині воронки [11].

Матеріали та методи досліджень макету групування домішок. Вибір засобів вимірювань.

Оцінювання очищення рідини від домішок проводилось вимірюванням концентрації заряджених часточок у рідинному середовищі на вході і виході пристрою електромагнітного очищення. Для досліджень обрано кондуктометр ИПП-М-30 науково-виробничого підприємства «Зонд» (м. Харків). Кондуктометр ИПП-М-30 зареєстрований у Державному реєстрі засобів вимірів за номером № У1443-01. Сертифікат про затвердження типу засобів вимірювання UA-MI/p-991-2001.

Методика та програма дослідження макету групування домішок.

Англійський фізик О. Рейнольдс при вивченні руху рідини по прямій трубці, помітив, що при малих швидкостях кожна частинка рухається прямолінійно (ламінальний рух). Якщо збільшити швидкість частинок, в потоці утворюються завихрення [12]. Швидкість руху течії максимальна в центрі трубки і зменшується біля стінки (турбулентний рух). Перехід течії ламінарного руху в течію турбулентного залежить від діаметру труби, швидкості руху, в'язкості та густини рідини. Під час дослідів здійснювалось регулювання швидкості руху рідини для вибору оптимального режиму роботи макету групування.

За рівняннями Улісса Діні [13] створено модель траєкторії зарядженої частинки, яка навівається на лінії магнітної індукції. Моделювання проведено в оболонці LabVIEW.

$$\begin{aligned} x &= ae^{k\varphi} \cos\varphi, \\ y &= ae^{k\varphi} \sin\varphi, \\ z &= be^{-k\varphi}, \\ x &= at \cos(t), \\ y &= at \sin(t), \\ z &= bt. \end{aligned} \quad (1)$$

На рисунку 2 зображено математичну модель виру обертання молекул рідини з домішками у вигляді віртуального дослідницького приладу.

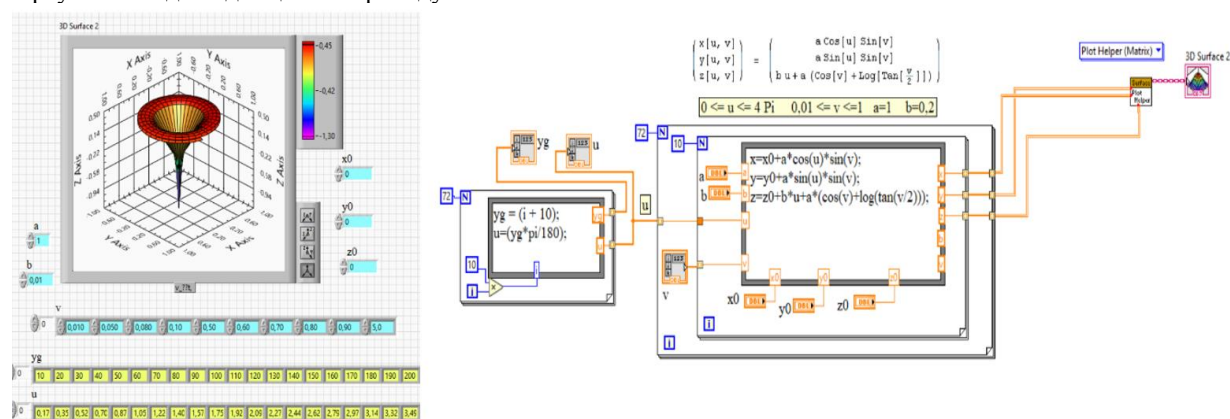


Рисунок 2. - Рівняння Діні підготовлене для реалізації макету параболоїду обертаня в оболонці LabVIEW.

Робота фізичної моделі доочищення рідини від домішок групуванням, показана на рисунку 3а) та 3б). Принцип роботи показано на рисунку 3. Він полягає в концентруванні домішок в центрі фізичної моделі під дією гравітаційного поля Землі. Групування домішок вздовж осі створеної фізичної моделі відбулось через різницю між значеннями густини молекул протестованих речовин, а саме 861 кг/м³ для масла типу API TC [14] і води 1000 кг/м³ [15].

Доочищення рідини від домішок пропонується досягти їх групуванням (скупченням) вздовж осі робочої камери групування. Мінімальний діаметр обертаня домішок визначений діаметром отворів видалення домішок з потоку рідини у бак забрудненої рідини. Взаємодію між масами домішок та води можна описати гравітаційно-магнітними силами Лоренца, які діють так само як рухомі електричні заряди в електродинаміці. При русі зарядженої частки у магнітному полі сила Лоренца роботи не здійснює. Тому модуль вектору швидкості під час руху частки не змінюється. Якщо заряджена частка рухається в однорідному магнітному полі під дією сили Лоренца а її швидкість лежить у площині, перпендикулярній

вектору магнітної індукції, то частка рухатиметься по колу радіусу Лармора [16]. Це зображено на рисунку 4. Тому, для зниження концентрації домішок у рідині, використано силу Лоренца.

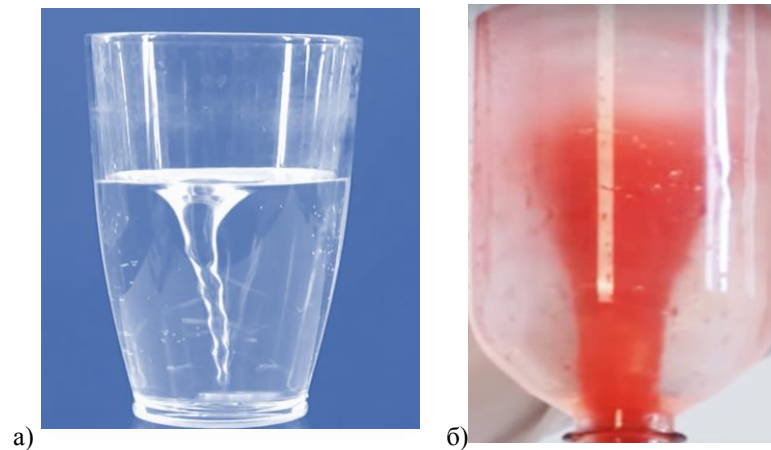


Рисунок 3. а) фізична модель обертання води. б) фізична модель обертання води з домішками масла двох тактового двигуна API TA забарвленого в червоний колір.

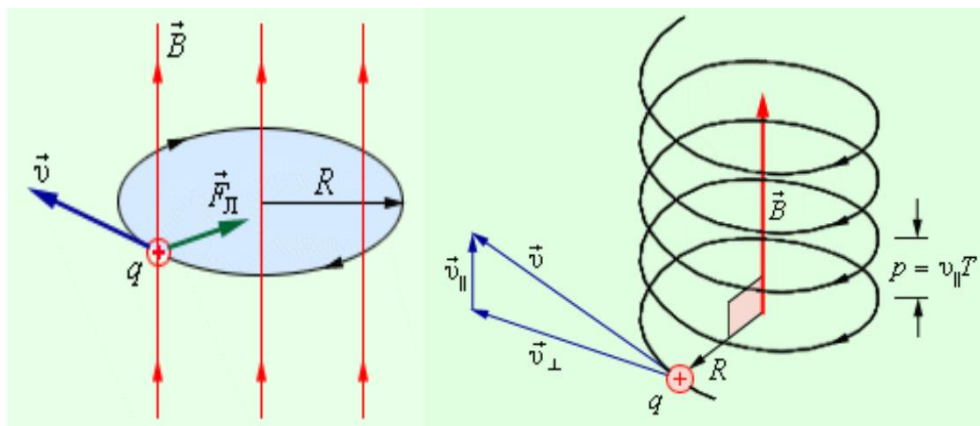


Рисунок 4. – Коловий рух частинки в магнітному полі [17].

Висновки. 1. Проведено аналіз відомих систем очищення рідинних середовищ, доведена можливість створення виру домішок густиною 861 кг/м^3 в рідині густиною 1000 кг/м^3 їх скупченням коло осі меншого радіусу біля отвору видалення домішок.

2. Обрано, за базову математичну модель на основі рівнянь Діні для процесу групування домішок за допомогою магнітного поля.

3. Створено макет очищення і видалення домішок з потоку висотою 305 мм та діаметром 100 мм, що дозволило в три рази скоротити матеріальні і часові витрати та обрати раціональні параметри системи очищення рідинних середовищ.

4. Для кращого моделювання системи видалення домішок з основного потоку доцільно створити дослідницький стенд, на якому провести повні дослідження при швидкості руху рідини 1 м/с, що на порядок скоротить матеріальні і часові витрати при визначених параметрах для різних рідинних середовищ, що забруднюють робочі рідини.

Практичні рекомендації. 1. Робота робочої камери групування полягає в управлінні траєкторією руху заряджених домішок.

2. Необхідно забезпечити концентрацію домішок уздовж осі робочої камери для подальшого їх видалення.

3. За рахунок розміщення котушок різної індуктивності на зовнішній поверхні РКГ забезпечується рух домішок всередині РКГ за радіусом Лармора.

4. Для регулювання концентрації магнітного поля всередині РКГ необхідно обирати параметри системи, які забезпечують утворення параболоїда обертання домішок вздовж осі камери.

Список використаної літератури

1. *Стан водних ресурсів і методи очищення води: Журнал ECOBUSINESS* (2016) Головна. Available at: <https://ecolog-ua.com/articles/stan-vodnih-resursiv-i-metodi-ochishchennya-vodi> (Accessed: March 15, 2023).
2. *Водний Кодекс України* Вводиться в дію Постановою ВР № 214/95-ВР від 06.06.95, ВВР, 1995, № 24, ст. 190. Вводиться в дію № 2468-ІХ від 28.07.2022.
3. *Постанова КМУ*. Про затвердження п. 18, Правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами від 25 березня 1999 р. № 465. Із змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 748 (748-2013-п) від 07.08.2013 р.
4. *Харківський національний автомобільно-дорожній університет* (2019) *ХНАДУ*. Available at: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%9C_%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D%D0%A1%D0%9F/%D0%95%D0%91%D0%9A_%D0%90%D0%9D%D0%A1/VIDPRATSO VANI_MASTYLA.pdf (Accessed: March 15, 2023).
5. Б. І. Дембович and С. В. Яворська (2013) *Забруднення океанів нафтою та нафтопродуктами, Забруднення океанів нафтою та нафтопродуктами | Кафедра зоології та екології ДНУ*. Available at: https://www.zoology.dp.ua/z13_023.html (Accessed: March 15, 2023).
6. Голик, О.П. et al. (2019) *СУЧАСНІ МЕТОДИ ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЙНИХ РОЗЛИВІВ НАФТИ НА ВОДНИХ ОБ'ЄКТАХ СУХОДОЛЛЮ*. Available at: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/12>.
7. Литвиненко, В. А. (2018). «Модернізація установки мікробіологічного очищення стічних вод хімічних підприємств» (dissertation). Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Київ, Україна.
8. *ЗАКОН УКРАЇНИ Про Загальнодержавну цільову соціальну програму "Питна вода України" на 2022 - 2026 роки*. LIGA360. (n.d.). Retrieved February 28, 2023, from <https://ips.ligazakon.net/document/LI05633A?an=3>.
9. Кожевніков, В.А. (no date) «Огляд доповідей, з коментарями III Міжнародної конференції «Альтернативні джерела енергії для великих міст» Секція: Енергетика великих міст: нові технології та використання.»
10. Garry McCracken and Peter Stott (2012) *Magnetic confinement, Fusion (Second Edition)*. Academic Press. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123846563000052>.
11. Francisco J. Bernn-Vera, Yan Wang, Maria J. Olascoaga, Gustavo J. Goni, George Haller, Objective Detection of Oceanic Eddies and Agulhas Leakage. *J. Phys. Oceanogr.*, 43, 1426-1438, 2013. Francisco J. et al. (2013) *Objective Detection of Oceanic Eddies and Agulhas Leakage*. *J. Phys. Oceanogr.*
12. Халатов, А. А., Мочалін, Є. В., & Димитрієва, Н. Ф. (2019). *Основи Теорії Примежового Шару*. (Т. В. Литвинова, Ed.). КПП ім. Ігоря Сікорського. Retrieved February 28, 2023, from https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26035/1/OTPSH_NavchPosib_Khalatov-Mochalin-Dymytriieva_2019.pdf.
13. Gray, A. (1997) *Dini's Surface, Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica, 2nd ed.* Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 493-495, 1997.
14. *Масло моторне Pennasol two stroke speed. API TC* (no date) *ТЕХНО_СИНТЕЗ ОЙЛ*. Available at: <https://sintez-oil.com.ua/ua/p493889914-maslo-motornoe-pennasol.html> (Accessed: March 17, 2023).
15. О.Ф. Шульженко (2017) *Фізичні властивості води, Фізичні та хімічні властивості води - КІП*. Available at https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjE4_P_50P9AhWLg_0HHZnUDT0QFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fela.kpi.ua%2Fbitstream%2F123456789%2F20784%2F1%2FEkologich_monitoring.docx&usg=AOvVaw3YBjVIZbXOpekBeJNwqZA5.
16. Bellan P. M. *Fundamentals of Plasma Physics*. Cambridge University Press, 2012.
17. § 52. *Сила Лоренца* (no date) *StudFiles*. Available at: <https://studfile.net/preview/5226287/page:61/> (Accessed: March 15, 2023).

O. Terentiev¹ Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2523-2804

M. Kudilchak¹, student, ORCID 0000-0003-1009-7304

N. Zhukova¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-4215-6981

S. Kudilchak¹, student, ORCID 0000-0002-9978-5121

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

PURIFICATION OF LIQUIDS IMPURITIES BY ELECTROMAGNETIC INFLUENCE

The importance of liquid purification leads to a decrease in the concentration of pollutants mainly in the stream during its use. This paper analyzes the relevance of document verification in accordance with existing legislation. An analysis of actual physical and chemical methods of liquid purification was carried out. The creation of a working chamber for the grouping of impurities for liquid purification is described. The result was achieved by electromagnetic influence on charged impurities. The scientific news of the study of the creation of a paraboloid of rotation of impurities has been created. The principle of operation of the cleaning system is shown on the example of the grouping of oil and water impurities. Research results show the possibility of liquid purification by controlling the trajectory of impurities. The work uses the Dini equation (Italian: Ulisse Dini) to describe the mathematical model of the grouping of impurities. A model of the trajectory of impurities in the LabVIEW shell was created. The possibility of further purification of the liquid by the method of electromagnetic grouping and

subsequent removal of impurities from the flow was verified. The study takes place in the installation of inductance coils on the outer surface of the impurity grouping chamber. The trajectory of the movement of impurities in the magnetic field is determined. The electromagnetic influence on the charged impurities changes their trajectory and causes the impurities to move along the Larmor radius. When the magnitude of the electromagnetic field increases, the speed of movement of the impurity increases, and the radius of motion of the impurity decreases. It has been proven that impurities with a lower density are better concentrated in the center of the RKG. The parameters of the coils for creating an electromagnetic field are selected. The model of the rotation of oil impurities in the driver is reproduced on the model. The change in the specific conductivity of the water medium with increasing magnetic field induction was verified. At the first stage, we offer the construction of a stand for further purification of liquid by the method of electromagnetic grouping of impurities. Practical recommendations are given for achieving the efficiency of the electromagnetic method of liquid purification and its reuse.

Keywords: *liquid purification, impurities, magnetic field, Lorenz force, paraboloid of rotation, focusing of impurities.*

References

- 1.State of water resources and methods of water purification: ECOBUSINESS Magazine (2016) Main. Available at: <https://ecolog-ua.com/articles/stan-vodni-resursiv-i-metodi-ochishchennya-vodi> (Accessed: March 15, 2023).
- 2.The Water Code of Ukraine was put into effect by the decision of the Supreme Court dated 06.06.1995 N 214/95-VR, Supreme Court, 1995 N 24, Article 190. N 2468-IX dated 07.07. 28/2022 entered into force.
- 3.Resolution of the CMU. On the approval of clause 18 of the Rules for the protection of surface waters from pollution by return waters dated 03.25.1999 No. 465. With changes introduced in accordance with the resolution of the CMU dated 07.08.2013 No. 748 (748-2013).
- 4.Kharkiv National Automobile and Road University (2019) Khnadu. Access mode: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/%D0%90%D0%92%D0%A2%D0%9E%D0%9C_%D0%A2%D0%A0%D0%90%D0%9D%D0%A1%D0%9F/%D0%95%D0%91%D0%9A_%D0%90%D0%9D%D0%A1/VIDPRATSO VANI_MASTYLA.pdf (View date: March 15, 2023 .)
- 5.Dembovych B. I., Yavorska S. V. (2013) Pollution of oceans with oil and petroleum products, Pollution of oceans with oil and petroleum products | Department of Zoology and Ecology of DNU named after Access mode: https://www.zoology.dp.ua/z13_023.html (View date: 03/15/2023).
- 6.Golyk O.P. and others. (2019) MODERN METHODS OF ELIMINATION OF EMERGENCY OIL SPILLS ON LAND WATER BODIES. Available at: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/12>.
- 7.Lytvynenko, V. A. (2018). "Modernization of the installation of microbiological wastewater treatment of chemical enterprises" (dissertation). Institute of Energy Saving and Energy Management, Kyiv, Ukraine.
- 8.THE LAW OF UKRAINE On the Nationwide Targeted Social Program "Drinking Water of Ukraine" for 2022-2026. LIGA360. (n.d.). Retrieved February 28, 2023, from <https://ips.ligazakon.net/document/JI05633A?an=3>.
- 9.Kozhevnikov, V.A. (no date) "Review of reports, with comments of the 3rd International Conference "Alternative energy sources for large cities" Section: Energy of large cities: new technologies and use."
- 10.Garry McCracken and Peter Stott (2012) *Magnetic confinement, Fusion (Second Edition)*. Academic Press. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123846563000052>.
- 11.Francisco J. Bernn-Vera, Yan Wang, Maria J. Olascoaga, Gustavo J. Goni, George Haller, Objective Detection of Oceanic Eddies and Agulhas Leakage. J. Phys. Oceanogr., 43, 1426-1438, 2013. Francisco J. et al. (2013) *Objective Detection of Oceanic Eddies and Agulhas Leakage*. J. Phys. Oceanogr
- 12.12. Khalatov, A. A., Mochalin, E. V., & Dimitrieva, N. F. (2019). Basics of Boundary Layer Theory. (T.V. Litvynova, Ed.). KPI named after Igor Sikorsky. Retrieved February 28, 2023, from https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26035/1/OTPSH_NavchPosib_Khalatov-Mochalin-Dymytriieva_2019.pdf.
- 13.Gray, A. (1997) *Dini's Surface, Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica, 2nd ed.* Boca Raton, FL: CRC Press, pp. 493-495, 1997.
- 14.Motor oil Pennasol two stroke speed. API TC (no date) TECHNO_SYNTHESIS OIL. Access mode: <https://sintez-oil.com.ua/ua/p493889914-maslo-motornoe-pennasol.html> (Access date: 03/17/2023).
- 15.O.F. Shulzhenko (2017) Physical properties of water, Physical and chemical properties of water - KPI. Available at https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjE4_P_5OP9AhWLg_0HHZnUDT0QFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fela.kpi.ua%2Fbitstream%2F789%2F20784%2F1%2FEkologich_monitoring.docx&usq=AOvVaw3YBjVIZbXOpekBeJNwqZA5.
16. Bellan P. M. Fundamentals of Plasma Physics. Cambridge University Press, 2012.
- 17.§ 52. Lorentz force (no date) StudFiles. Available at: <https://studfile.net/preview/5226287/page:61/> (Accessed: March 15, 2023).

Надійшла: 12.04.2023
Received: 12.04.2023