

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кольцов Михайло Андрійович

УДК 544.032.53

**ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ МІКРОПЛАСТИКУ В СТІЧНИХ ВОДАХ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ ОЧИСТКИ**

Спеціальність 101 «Екологія»

Автореферат
дисертації на здобуття ступеня магістра

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрах інженерної екології та електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук,
СЕРБІНОВА Лариса Анатоліївна,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського».

Рецензент

професор, доктор технічних наук
Розен Віктор Петрович,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут»,
завідувач кафедри автоматизації
управління електротехнічними
комплексами

Консультант

доктор технічних наук, доцент
Терентьєв Олег Маркович,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний
інститут»,
професор кафедри
електромеханічного обладнання
енергоємних виробництв
(м. Київ)

Захист відбудеться «25» травня 2018 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні ДЕК кафедри інженерної екології в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, ауд. 201-22.

З дисертацією можна ознайомитися на кафедрі інженерної екології в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, ауд. 203-22.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Питання забруднення водного середовища мікроскопічними частками пластику вперше порушено в 1970-х роках у роботах. Інтенсивні дослідження були продовжені:

Ентоні Андраді – в 2003 році книгою «PLASTICS AND THE ENVIRONMENT», статтями “Microplastics in the marine environment” 2011 року, “River plastic emissions to the world’s oceans” 2017 року тощо. Досліджував мікропластик з точки зору механізмів взаємодії пластмас з навколишнім середовищем, лідер північноамериканської школи.

Фредеріком Нореном – статті «Small plastic particles in Coastal Swedish waters» (2007), “Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant” (2014), Microplastics Occurrence, effects and sources of releases to the environment in Denmark (2015) та ін. Океанолог, розширив розуміння механізмів потрапляння мікропластику до морського середовища з суші.

Річардом С. Томпсоном – “Lost at Sea: Where Is All the Plastic?” (2004), “Competitive sorption of persistent organic pollutants onto microplastics in the marine environment” (2012), “The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review” (2013) та ін. Британський океанолог, першим порушив питання невідповідності розрахункових даних щодо пластиковому забрудненню морів експедиційним результатам, що призвело до визначення масштабу проблеми мікропластику.

Валерія Ідальго-Пуз – “Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification” (2012). Чилійська дослідниця, що класифікувала та систематизувала існуючі методи дослідження мікропластикового забруднення водного середовища.

Мюрреєм Р. Грегорі – “Environmental implications of plastic debris in marine settings - entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions” (2012). Гідробіолог, основною темою робіт є вплив мікропластику на стан живих організмів.

Франсуа Гальгані – “Marine litter within the European Marine Strategy Framework Directive” (2015), Microplastics in Seawater: Recommendations from the Marine Strategy Framework Directive Implementation Process (2016), був залучений до розробки MARINE STRATEGY FRAMEWORK DIRECTIVE у 2009-2010 роках. Еколог-інституціоналіст, очолював розробку документів ЄС щодо проблеми мікропластику та шляхів її визначення.

Меттью Колем – “Microplastics as contaminants in the marine environment: A review” (2011), “Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms” (2014) та ін. Британський гідроеколог, детально дослідив мікропластикове забруднення Плімутської затоки, один з лідерів британської школи.

В 2016-2018 роках були розроблені та прийняті стратегії поводження з пластиком/мікропластиком в ЄС, США, Великій Британії.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В Україні зниження концентрації забрудників (до яких відноситься мікропластик) відповідає державній цільовій програмі “Питна вода України” на 2011-2020 роки, затвердженій Законом України від 20.10.2011 № 3933-VI та державній цільовій програмі розвитку

водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року, затверджений Законом України від 24.05.2012 № 4836-17.

Мета – виведення часток мікропластику з основного потоку рідини за конічною траєкторією Діні, що забезпечується сумісною дією на них сил Лоренца і Лармора.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні **завдання**:

1. Створити математичну модель та провести моделювання магнітних режимів фокусування потоку домішок в рідині.

2. Розробити дослідницький стенд фокусування домішок в потоці рідини для видалення мікропластикових домішок та обґрунтування його робочих режимів.

3. Одержати залежності між робочими параметрами магнітного модулю фокуруючої установки (сила струму, кількість витків, взаємне розташування котушок) та фізико-хімічними характеристиками забрудників.

Об'єкт дослідження – процес очистки рідини від мікропластику за рахунок зміни траєкторій його частинок у потоці.

Предмет дослідження – закономірності зниження концентрації мікропластику у рідині в залежності від: сили струму; напруги; кількості витків і взаємно розміщення електромагнітів.

Методи дослідження. При проведенні дослідження використані наступні методи: *структурного аналізу та синтезу* обрано спосіб та засіб зменшення концентрації мікропластику у водному середовищі шляхом магнітного впливу; *абстрагування* потік рідини представлено як трансляційний рух часток мікропластику в напрямку рушійної сили шляхом формування конічної поверхні Діні; *формалізації* використано основні принципи гідродинаміки, динаміки суцільних середовищ, математичної фізики при врахуванні ефекту симультанної дії сил Лоренца і Лармора; систематизації для дослідження впливу магнітного поля на водне середовище з частинками мікропластику, додослідження їх як єдиного цілого із узгодженим функціонуванням усіх елементів та частин; *експеримент* для підтвердження аналітичних досліджень процесу зменшення концентрації мікропластику у на водному середовищі, *техніко-економічний аналіз* отриманих результатів для підготовки практичного застосування.

Наукова новизна одержаних результатів, полягає в наступних наукових положеннях:

- **встановлено** залежності напруженості електромагнітного поля від сили струму та геометрії генераторів магнітного поля (котушок) при видаленні мікропластику;
- **визначено, що** під впливом керованого магнітного поля на потік рідини з мікропластиком траєкторія руху його часток вимушено набуває конічної форми (конічна траєкторія Діні);

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- Розроблено стенд для експериментального дослідження впливу електромагнітного поля на забрудники та домішки у потоці води;
- Очікується впровадження системи магнітного фокусування домішок після моделювання і вибору режимів експлуатації експериментальним шляхом;
- Матеріали роботи використовуються при викладанні курсу «Фізичні методи очистки водних середовищ».

Публікації. Результати роботи опубліковано в 1 науковій статті в фаховому виданні.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 77 сторінок. Робота містить 16 рисунків, 16 таблиць, 7 додатків. Список використаних літературних джерел включає 97 найменувань (на 10 сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **ВСТУПІ** визначено актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, мету і завдання дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження, наукові положення та новизну одержаних результатів, практичне значення, особистий внесок здобувача, об'єм і структура роботи.

У **ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ** проведено аналіз наукових публікацій щодо мікропластику у водному середовищі та очищення води від нього фізичними методами. Визначено ключові напрями наукової думки в сфері мікропластику в водному середовищі: порівняння та пошук закономірностей в розповсюдженні мікропластику у гідросфері, розробка державних та міждержавних директив, пошук ефективних способів видалення мікропластику з води.

Дослідженнями джерел пластикових забруднень займалися вчені наступних шкіл та об'єднань:

Школи Плімутського університету та університету Ексетеру (Великобританія). Представниками «плімутської школи» можна вважати Річарда С. Томпсона, Стівена Дж. Ронвальда, Меттью Коля, Аділя Бакіра, Пенні Ліндек, Тамару С. Галлоуей, Стефані Л. Райт та ін. Здобутками «британської школи» є дослідження динаміки розподілення мікропластику в Атлантичному океані (зокрема в Саргасовому морі) та координуюча роль проміж інших дослідницьких груп.

Школи університету Північної Кароліни та університету Нью-Йорку (США) – Ентоні Андраді, Мортон Барлаз, Шеррі Мейсон, Ханна Ферлі, Ніколас Дж. Вільямсон, Даніель Гарно, Івонн Чу, Паркер Фінк та ін. Американська школа зосереджена на дослідженнях в межах США та Канади (узбережжя Нової Шотландії, затока Святого Лаврентія тощо).

Школи Оснабрюкського університету (Німеччина) – Ельке Фріс, Йенс Х. Декіфф, Яна Вільмеєр, Марі-Тереза Нюлле, Домінік Ремі та ін. Школа фокусується на розвитку методів оцінки мікропластикового забруднення, фізичних методах оцінки його складу (FTIR, Раманова спектроскопія тощо).

Школи Токійського університету сільського господарства та технологій – Хісаші Хіраї, Хідешіге Такада, Юко Огата, Рей Ямашіта, Масакі Юяма, Макі Іто, Кароюко Мізукава та ін. Токійська школа зосереджена на транспортній функції мікропластику щодо ПХБ та інших СОЗів.

Державними агенціями Данії, Швеції, Ірландії тощо. Основним внеском є публікація щорічних звітів щодо стану навколишнього середовища у відповідних країнах.

Також було проаналізовано фізичні методи очистки рідин від забрудників та відібрано два основних прототипи.

Прототип-1. Проведено математичне моделювання та експеримент з метою вивчення впливу поділу включень за наявності комбінованого магнітного поля (combined magnetic field - CMF), створеного синхронним застосуванням обертового магнітного поля (rotating magnetic field - RMF) і более слабого движущегося

магнітного поля (traveling magnetic field - TMF). Експериментальна установка складається з двох наборів рівновіддалених систем котушок, що живляться асинхронними струмами. CMF об'єднує обертальний ефект RMF і транспортний ефект TMF. Об'ємна частка частинок і траєкторії були змодельовані, щоб вивчити механізм поділу частинок. Досягнуто збігу експериментальних і розрахункових результатів. Поле потоку і електромагнітна сила є двома основними чинниками, що відповідають за рух частинок. Цей тип CMF забезпечує високоефективний підхід до усунення включень.

Прототип-2. Очищення води осесиметричним фокусованим магнітним полем. Розроблено комплексну програму та методику теоретичних і експериментальних досліджень очищення води фокусованим магнітним полем. Метою експериментального дослідження ефективності очищення води фокусованим магнітним полем є знаходження значень чинників очищення, які б забезпечили максимальну ефективність очищення при визначених обмеженнях на них. Розглянуто чинники, які впливають на рух йонів домішок у потоці води у фокусованому магнітному полі. З них при математичному моделюванні закономірностей руху заряджених частинок враховано силу Лоренца та силу лобового опору руху частинки з боку потоку. Наведено конструктивне вирішення пристрою магнітного очищення – блоку магнітного очищення (БМО). Також запропоновано технологічну схему очищення засолених шахтних вод за умови підвищення продуктивності та ефективності БМО.

У **ДРУГОМУ РОЗДІЛІ** проведено математичне моделювання траєкторії частинки в однорідному магнітному полі, відмінність якої полягає у врахуванні маси, заряду, швидкості потоку рідини, сили струму та довжини котушок електромагнітів.

В якості моделі поверхні використано конус Улісса Діні, що задається системою рівнянь:

$$\begin{aligned} x &= a \cdot \cos(u) \cdot \sin(v); \\ y &= a \cdot \sin(u) \cdot \sin(v); \\ z &= b \cdot u + a \cdot (\cos(v) + \log(\tan(v/2))); \end{aligned} \quad (1)$$

Діапазон зміни параметрів рівняння:

$$\begin{aligned} 0 &\leq u \leq 4\pi; \\ 0,01 &\leq v \leq 1; \\ a &= 1, b = 0,2 \end{aligned} \quad (2)$$

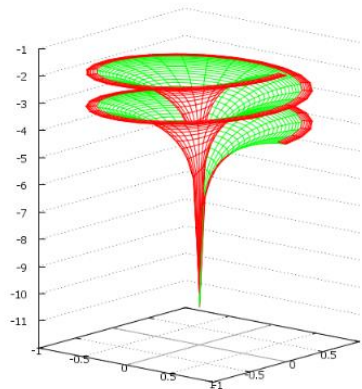


Рисунок 1. Конус Улісса Діні

Параметр a було проінтерпретовано через ларморовий радіус – радіус обертання частинки в окремо взятому перерізі конусу. Параметр b є коефіцієнтом при закручуванні траєкторії частинки.

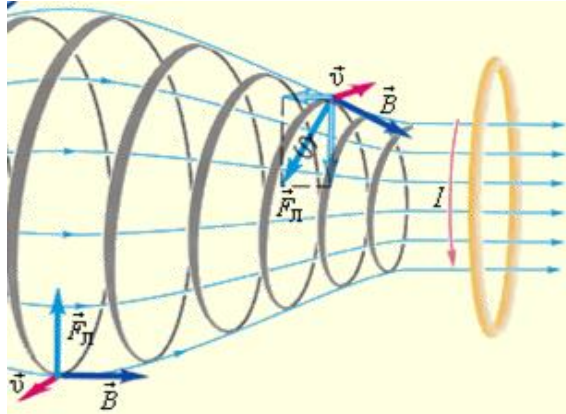


Рисунок 2. Створення сили Лоренца котушкою зі струмом

Радіус витка спіралі руху зарядженої частинки в однорідному магнітному полі:

$$r_g = \frac{m \cdot v_{\perp}}{|q| \cdot B}, \quad (3)$$

де r_g – Ларморів радіус, м;

m – маса зарядженої частинки, кг;

v_{\perp} – швидкість частинки, перпендикулярна лініям магнітної складової поля, м/с;

q – заряд частинки, Кл;

B – магнітна індукція, Тл.

Магнітна індукція:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_i \cdot H, \quad (4)$$

де $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ – магнітна стала, Гн/м;

μ_i – магнітна проникність, о.е.;

H – напруженість поля, А/м.

Напруженість поля, А/м:

$$H = \frac{I \cdot n}{l}, \quad (5)$$

де I – струм контуру намагнічування, А;

n – кількість витків котушки фокусування, шт.;

l – довжина котушки фокусування, м.

Підставивши (4) та (5) в (3), Ларморів радіус буде дорівнювати:

$$R_l = \frac{m \cdot v_{\perp} \cdot l}{|q| \cdot \mu_0 \cdot \mu_i \cdot I \cdot n}. \quad (6)$$

В якості моделі частинки забрудника візьмемо іон феруму Fe^{2+} .

$m = 9,27 \cdot 10^{-26}$ - маса зарядженої частинки (Fe^{2+}), кг (Додаток В);

v_{\perp} - швидкість частинки, перпендикулярна лініям магнітної складової поля, м/с;

l – довжина котушки фокусування, м.

q – заряд частинки, Кл;

$\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ – магнітна стала, Гн/м;

μ_i – магнітна проникність, о.е;

I – струм контуру намагнічування, А;

n – кількість витків котушки.

$$R_1 = \frac{m \cdot v_{\perp} \cdot l}{|q| \cdot \mu_0 \cdot \mu_i \cdot I \cdot n} = \frac{9,27 \cdot 10^{-26} \cdot 1,5 \cdot 0,275}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 0,99 \cdot 0,02 \cdot 100} = \frac{3,82 \cdot 10^{-26}}{8,0422 \cdot 10^{-25}} = 0,095 \text{ м}$$

Обрано конічну гвинтову лінію за рівнянням Улісса Діні як тривимірне геометричне зображення траєкторій домішок в потоці води.

На базі рівняння Діні та рівняння витка траєкторії частинки в однорідному магнітному полі розроблено математичну модель, відмінність якої полягає у врахуванні маси, заряду, швидкості потоку рідини, сили струму та довжини котушок електромагнітів.

У **ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ** розроблено програму, методику та стенд для проведення досліджень. Досліджуються закономірності електромагнітного впливу на мікропластик у водному середовищі магнітною системою фокусування потоку домішок. Фокусування проводиться за рахунок зміни індукції магнітного поля. Метою експериментальних досліджень є знаходження оптимальних значень індукції магнітного поля. На експериментальному стенді планується проведення експериментів зі зміни траєкторій фрагментів мікропластику магнітним полем. Обраними чинниками, що впливають на траєкторію фрагментів, є:

- індукція електромагнітного поля;
- довжини котушок;
- швидкість потоку води.

Вхідні дані для розробки стенду в відповідності до мети дослідження наведені в таблиці 1

Таблиця 1 Технічні характеристики стенду

Параметр системи	Значення
1	2
1. Вхід та вихід трубопроводу системи (діаметр), м	0,16
2. Параметри ділянки, що необхідні для розміщення системи фокусування, не більше ніж, м	2x3
3. Режим роботи	Безперервний
4. Робоча пропускна здатність, м ³ /год	50
5. Максимальна пропускна здатність, м ³ /год	150
6. Добові нормативні витрати води, м ³ /добу	1200
7. Вміст мікропластику, мг/дм ³	0.005

На концентрацію мікропластику у водному середовищі стенду впливають наступні групи параметрів:

- матеріал, маса, об'єм, щільність, форма, заряд часток мікропластику;
- витрата рідини, тиск, площа та форма перерізу трубопроводів гідросистеми;

- кількість генераторів (котушок), кількість витків у них, діаметр дроту соленоїда, індукція та напруженість магнітного поля, магнітний потік магнітної системи.

Основні вимоги до об'єкту дослідження:

- керованість (необхідно враховувати чинники об'єкту досліджень, що можна змінювати);
- однозначність (чинники не повинні залежати один від одного).

Цим вимогам відповідають наступні чинники, які обрані як головні:

- x_1 – витрата рідини в гідросистемі, м³/с;
- x_2 – індукція електромагнітного поля в котушках, Тл
- x_3 – кількість котушок.

Таким чином, математична модель оптимізації:

$$\min \bar{y} = \min \left(a_0 \cdot \exp \left(\begin{array}{l} a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + \\ + a_{23} x_2 x_3 + a_{123} x_1 x_2 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 \end{array} \right) \right), \quad (7)$$

де \bar{y} – змінна стану (концентрація мікропластику);

a_{ij} – коефіцієнти рівняння регресії.

Для спрощення аналізу нелінійної моделі її приведено до лінійного вигляду шляхом логарифмування правої та лівої частини рівняння:

$$\ln \bar{y} = \ln \left(a_0 \cdot \exp \left(\begin{array}{l} a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + \\ + a_{123} x_1 x_2 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 \end{array} \right) \right), \quad (8)$$

$$\bar{Y} = A_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + \\ + a_{123} x_1 x_2 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2, \quad (9)$$

де $\bar{Y} = \ln \bar{y}$, $A_0 = \ln a_0$.

Найпростішим планом експерименту є повночинниковий експеримент (ПЧЕ) типу 2^k . В ньому досліджувані змінні варіюються на двох рівнях, що розташовані симетрично відносно деякого нульового рівня – максимальному (+1) та мінімальному (-1). Кількість дослідів дорівнює $N=2^k$ (k – кількість чинників). У всіх дослідах кожен чинник повинен порівну побувати на верхніх та нижніх рівнях. Чинник x_0 – фіктивна змінна, що спрощує розрахунки коефіцієнтів рівняння регресії.

На підставі проведеного аналізу критеріїв оптимальності та планів експерименту для цього дослідження:

- критерій мінімуму кількості дослідів – для проведення мінімальної кількості дослідів;
- ненасичений ЦКП типу B_n , що має мінімальну (достатню) кількість рівнів варіювання чинників – 3 рівні;
- ядром плану є ПЧЕ типу 2^3 – 3 чинники, 15 дослідів.

В таблиці 2 наведено матрицю планування дослідження моделі в умовних змінних (де $N_z = \sum_{i=1}^N x_i^2$).

Таблиця 2 Матриця планування дослідження моделі в умовних змінних

№ досліджу	x_{10}	Планування									
		x_{11} 1	x_{12} 2	x_{13} 3	x_{11} x_{12} 4	x_{11} x_{13} 5	x_{12} x_{13} 6	x_{11} x_{12} x_{13} 7	x_{11} x_{12} x_{13} 8	x_{11} x_{12} x_{13} 9	x_{12} x_{13} 10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3	+1/3
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3	+1/3
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3	+1/3
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3	+1/3
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1/3	+1/3	+1/3
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1/3	+1/3	+1/3
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1/3	+1/3	+1/3
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1/3	+1/3	+1/3
9	+1	+1	0	0	0	0	0	0	+1/3	-2/3	-2/3
10	+1	-1	0	0	0	0	0	0	+1/3	-2/3	-2/3
11	+1	0	+1	0	0	0	0	0	-2/3	+1/3	-2/3
12	+1	0	-1	0	0	0	0	0	-2/3	+1/3	-2/3
13	+1	0	0	+1	0	0	0	0	-2/3	-2/3	+1/3
14	+1	0	0	-1	0	0	0	0	-2/3	-2/3	+1/3
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	-2/3	-2/3	-2/3
N_z	15	10	10	10	8	8	8	8	3,33	3,33	3,33

На рис. 3. представлено схему стану експериментальних досліджень, на рис. 4 – гідравлічну схему.

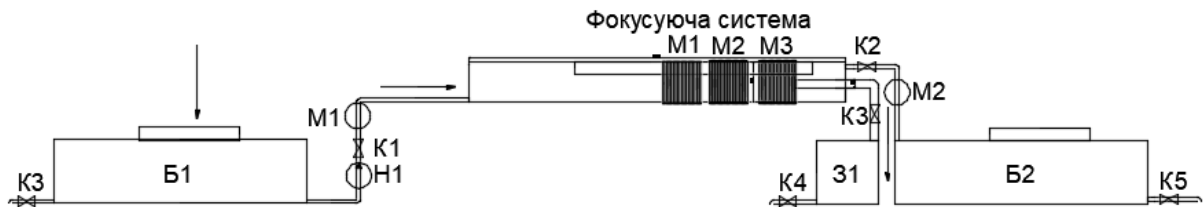


Рис. 3. Масо-габаритна схема стану

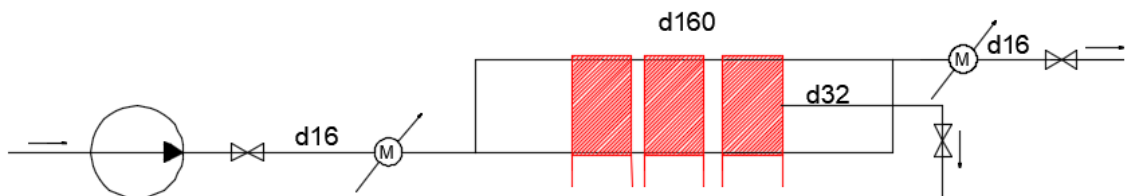


Рис. 4. Гідравлічна схема стану

Стенд складається з двох баків (Б1 та Б2), що імітують магістраль, та магнітної очисної системи, що з'єднана з ними трубопроводами з нержавіючої сталі діаметром в 0.5 дюйма (16 мм).

Фокусуюча система складається з:

- корпусу (ПВХ-труби діаметру 160 мм);
- вхідного та вихідного вузлів магістралі;
- котушок М1-М3, що створюють магнітне поле всередині труби;
- виходу потоку забруднень.

В схемі стану використано шарові крани (К1-К5 на рис. 3). Регулювання витрати рідини Q (м³/год) виконують за допомогою крану К1.

Вода з баку Б1 потрапляє до очисної системи завдяки насосу Sprut FSP-1843 (162110). Відноситься до фонтанних насосів, потужність 0.04 кВт, 30 л/хв, працює від мережі 220 В 50 Гц.

Індукцію магнітного поля B (Тл) змінюють шляхом зміни силу струму в котушках К1 – К3 та зміни відстані між ними. Початкові параметри котушок вказані в таблиці 3.

Таблиця 3. Параметри котушок магнітної очисної системи

Котушка	Кількість витків, шт	Переріз дроту s , мм ²	Довжина котушки L , м	Сила струму в котушках, А	Електромагнітна індукція, Тл
К1	50	2.5	0.14	0.05	$2.244 \cdot 10^{-5}$
К2				0.1	$4.488 \cdot 10^{-5}$
К3				0.15	$6.732 \cdot 10^{-5}$

Варіювання довжини розповсюдження магнітного поля досягається шляхом підключення різної кількості котушок (від 1 до 3).

Проби води відбирають напряму з баків Б1 та Б2 та ємності для забрудників З1 через крани К3-К5 за ГОСТ 24481-80 «Вода питьевая. Отбор проб» та методом університету Аальто.

Функцією стану є дослідження впливу магнітного поля на траєкторії фрагментів мікропластику у потоці води.

З баку Б1 вода, завдяки насосу Н1, потрапляє до очисної системи. При проходженні потоку крізь магнітне поле, згенероване котушками К1-К3, частинки забрудників (насамперед, мікропластику та Fe₂O₃) змінюють свої траєкторії відповідно до впливу Ларморової прецесії (див. розділ 2). Вони зсуваються до центру потоку та виводяться з нього за допомогою відвідного патрубка. Очищена вода потрапляє до баку Б2, забрудники та менша частина води – до ємності Є1.

Вимірювання концентрації мікропластику в баку Б2 та ємності Є1 проводиться після закінчення процедури видалення домішок з потоку води згідно описаної нижче методики.

Метод вимірювання концентрації мікропластику в баках базується на напрацюваннях Університету Аальто (Фінляндія), та включає аналогічний прилад. Фотографії приладу-прототипу наведені в Додатку Г. Система виміру концентрації мікропластику (СВКМ-1) та труба оцінювальна (ТО-1) складаються з:

- 4-х сегментів ПВХ труби діаметром 32 мм довжиною 100 мм кожний (Т1 – Т4), з'єднаних між собою за допомогою різьбового з'єднання;
- 3-х фрагментів (діаметром не менш ніж 40 мм) планктонної сітки С1 - С3 з розміром ґраток 300, 100 та 20 мкм відповідно;

- Вагів аналітичних лабораторних електронних МН-200 (200g) фірми Constant з внутрішнім калібруванням, графічним дисплеєм. Особливості графічного дисплею: діаграми, статистика, барографи, показник навантаження, дата та час вимірювання, підсвітлення дисплею. Переваги ваг: двосторонній зв'язок з комп'ютером; контроль за відхиленням при калібрування; велика камера завантаження. Найбільша границя завантаження – 200 г. Дискретність – 0,01 мг. Клас точності 1 (ГОСТ 24104-88 «Весы лабораторные общего назначения и образцовые. Общие технические условия»)
- ємності металевої або скляної об'ємом 1 л в якості тари;
- оптичного або електронного мікроскопу з роздільною здатністю не менше 10 мкм.

Алгоритм підготування системи до вимірів є наступним:

1. Зібрати трубу ТО-1 як зображено на рис. Г.1.
2. Увімкнути мікроскоп та відкалібрувати для дослідження предметів розміром від 20 до 300 мкм;
3. Увімкнути аналітичні ваги.

Алгоритм проведення вимірів є наступним:

1. Сітки С1-С3 та ємність Є1 зважуються на вагах.
2. Через кран К3, К4 або К5 вода з ємності повністю або частково спускається через трубу ТО-1 в ємність Є1.
3. Труба ТО-1 розбирається, сітки С1-С3 з мікропластиком на них поміщуються в сушильну шафу на 30 хвилин.
4. Ємність Є1 з водою зважується на вагах, з чого отримуємо масу та об'єм проби.
5. Висушені сітки С1-С3 зважуються на вагах для визначення масової частки мікропластику у пробі.
 - а. У випадку, якщо маса мікропластика менша за роздільну здатність вагів – розраховуємо масу через геометричні параметри фрагментів мікропластику та їх відносну щільність.
6. Сітки С1-С3 досліджуються за допомогою оптичного або електронного мікроскопу та визначити кількість частинок, що були на них затримані, їх типи, тощо за методикою університету Аальто.

Результатом вимірів є:

- Масова частка мікропластику у воді (якщо це можливо);
- Кількість фрагментів мікропластику у воді;
- Кількісне співвідношення фрагментів мікропластику та близьких за розміром та формою забрудників іншого походження.

В межах моделювання експерименту нижній рівень варіювання по витраті рідини прийнято рівним нормативному значенню витрати рідини відповідно до таблиці 3: $Q_{\min} = Q_n = 50 \text{ м}^3/\text{год} \approx 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$. Верхній рівень обрано згідно до пікової витрати рідини $Q_{\max} = Q_p = 150 \text{ м}^3/\text{год} \approx 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$. Нульовий рівень варіювання обрано для симетричності верхнього та нижнього рівнів відносно нульового:

$$Q_0 = 0,5(Q_{\max} + Q_{\min}) = 0,5(1,4 \cdot 10^{-2} + 4,1 \cdot 10^{-2}) = 2,75 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для конструктивно заданої довжини розповсюдження магнітного поля відповідно до розділу 2 необхідна і достатня індукція магнітного поля $2,244 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$. Тому прийнято мінімальне значення індукції магнітного поля $B_{\min} = 2,244 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.

Вибрані рівні та інтервали варіювання головних чинників (Q , B , L) в таблиці 4.

Матриця планування експерименту в явному вигляді наведена в таблиці 5.

Таблиця 4. Рівні та інтервали варіювання чинників

Чинник	Рівні			Інтервал варіювання
	Нижній (-1)	Нульовий (0)	Верхній (+1)	
x_1 – витрата рідини в гідросистемі, $\cdot 10^{-2}$ м ³ /с	1,4	2,75	4,1	1,35
x_2 – індукція магнітного поля системи, 10^{-5} Тл	2,244	4,488	6,732	2,244
x_3 – кількість котушок, шт	1	2	3	1

Таблиця 5. Матриця планування експерименту в явному вигляді

Порядок проведення досліджу	№ досліджу	x_0	Планування		
			x_1	x_2	x_3
			Витрата рідини, $\times 10^{-3}$ м ³ /с	Індукція магнітного поля, Тл	Кількість котушок, шт
<i>1 блок</i>					
1	1	+1	6,73	6,732	3
2	2	+1	1,4	6,732	3
3	3	+1	6,73	2,244	3
4	4	+1	1,4	2,244	3
5	13	+1	2,75	4,488	3
<i>2 блок</i>					
6	5	+1	6,73	6,732	1
7	6	+1	1,4	6,732	1
8	7	+1	6,73	2,244	1
9	8	+1	1,4	2,244	1
10	14	+1	2,75	4,488	1
<i>3 блок</i>					
11	9	+1	6,75	4,488	2
12	10	+1	1,4	4,488	2
13	15	+1	2,75	4,488	2
14	11	+1	2,75	6,732	2
15	12	+1	2,75	2,244	2

В межах третього розділу обрано критерій мінімуму кількості дослідів при дотриманні вимог до якості оцінки функції або чинників, ненасичений ЦКП типу B_n . Мінімальна (достатня) кількість рівнів варіювання чинників – 3 рівні, ядром плану є ПЧЕ типу 2^3 – 3 чинники, 15 дослідів. Основні етапи досліджень за розділом здійснено відповідно до методики досліджень магнітного впливу на водне середовище. Розроблено стенд, що дозволяє досліджувати зміну траєкторій домішок в потоці рідини під впливом електромагнітного поля.

У **ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ** розроблено віртуальний прилад в середовищі LabVIEW, що забезпечує формування конуса Діні у потоці рідини для моделювання роботи стенду. Зображення фронтальної панелі приладу наведено на рисунку 5, блок-діаграма віртуального приладу наведена на рисунку 6.

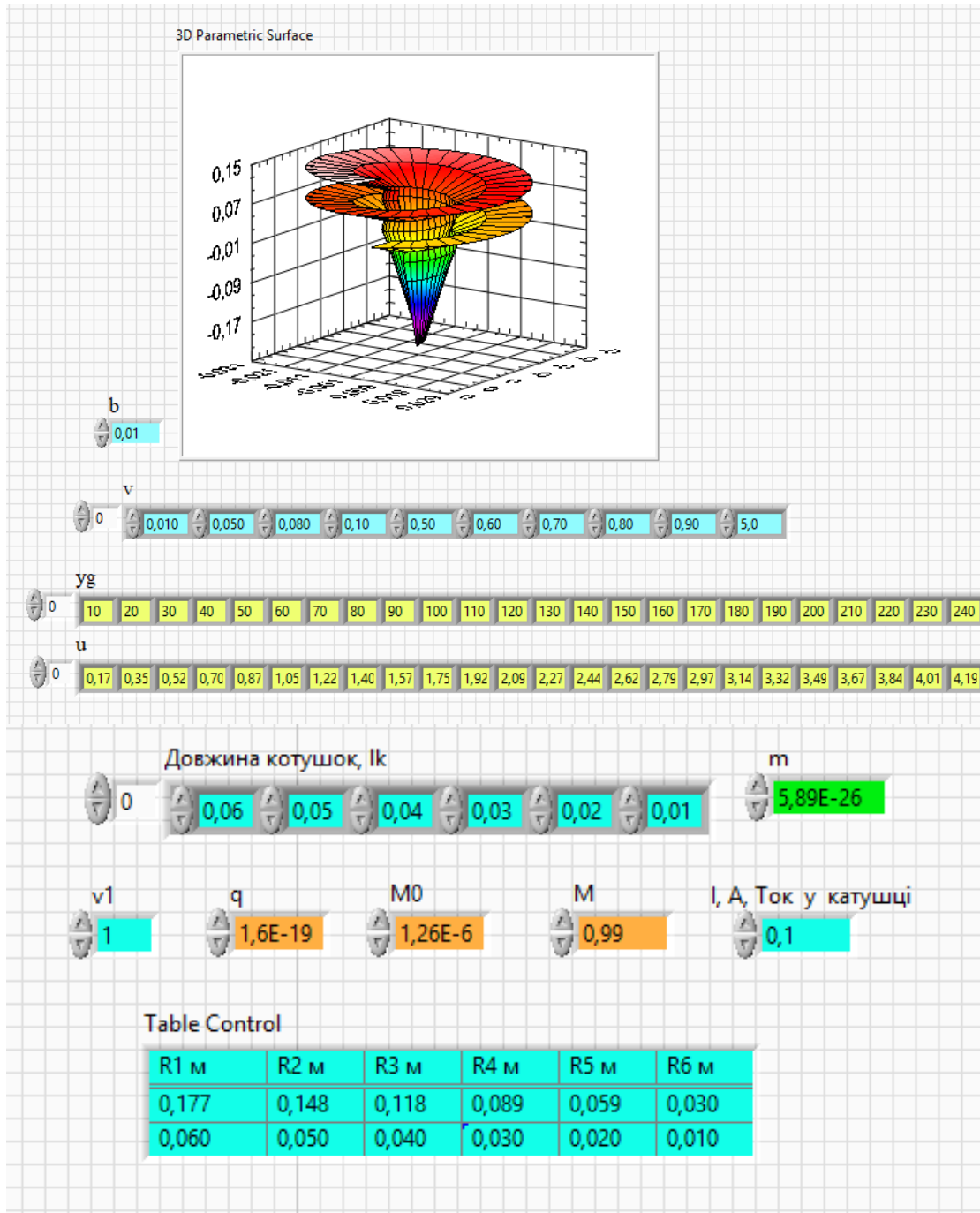


Рис. 5. Фронтальна панель віртуального приладу

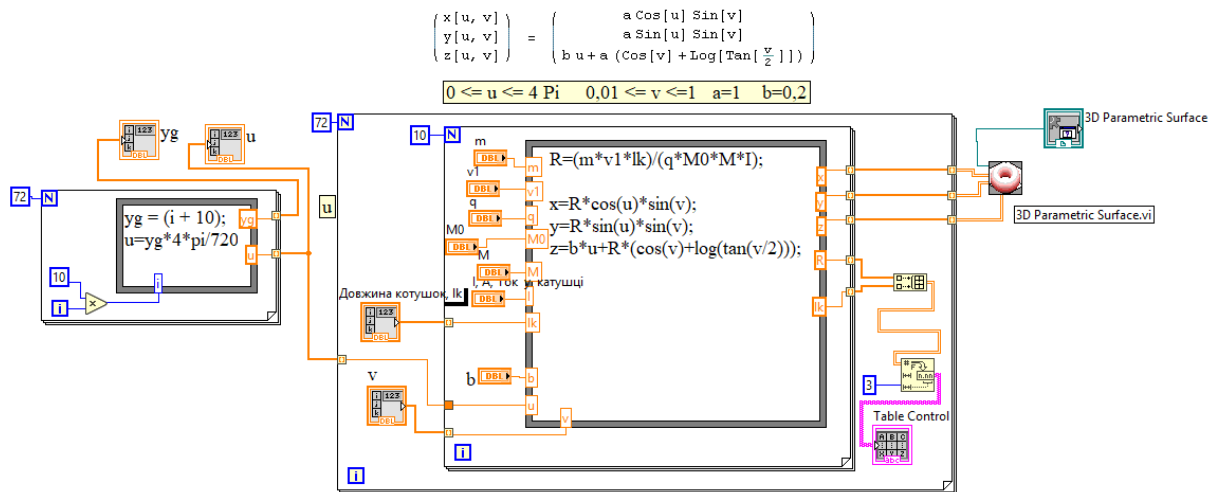


Рис. 6. Блок-діаграма віртуального приладу

Використовувані змінні та їх значення в межах моделі наведено в таблиці 6. Локальною метою моделювання є дослідження залежностей між змінними та Ларморовим радіусом та пошук робочих режимів.

Таблиця 6. Змінні віртуального приладу

Назва змінної	Од. вим.	Стандартний символ	Символ у програмі	Категорія
1. Ларморів радіус	м	R	R	Шукана величина
2. Маса частинки	кг	M	m	Характеристика забрудника
3. Перпендикулярна складова швидкості частинки	м/с	v_{\perp}	v_l	Характеристика режиму
4. Довжини котушок фокусування	м	L	lk	Характеристика режиму або установки
5. Заряд частинок	Кл	Q	q	Характеристика забрудника
6. Магнітна постійна	Гн/м	μ_0	M0	Константа
7. Магнітна проникність	-	M	M	Характеристика середовища та матеріалу
8. Сила струму в контурі намагнічування	А	I	I	Характеристика режиму
9. Координати x, y, z	-	-	-	Координати точок поверхні конуса Діні
10. Параметр b	-	-	-	Коефіцієнт при кутовій швидкості

У наступних таблицях за замовчуванням прийнято наступні параметри: маса частинки дорівнює 5.89×10^{-26} кг (маса іона хлору), перпендикулярна складова швидкості частинки складає 1.5 м/с, довжина котушки фокусування 0.06 м відповідно, сила струму в котушці складає 0.1 ампер, заряд складає 1.9×10^{-19} кулона, магнітна проникність складає 0.99, коефіцієнт b складає 0.02 - якщо не вказано інших значень.

Таблиця 7. Вплив зміни маси частинки на R при незмінності інших параметрів

№	m, кг	R, м
1	5,89E-26	0,266
2	5,89E-25	2,656
3	5,89E-24	26,560
4	5,89E-23	265,602
5	5,89E-22	2656,025

Таблиця 8. Вплив зміни перпендикулярної складової швидкості частинки на R при незмінності інших параметрів

№	v _⊥ , м/с	R, м
1	0,5	0,089
2	1,0	0,177
3	1,5	0,266
4	2,0	0,354
5	2,5	0,443

Таблиця 9. Вплив зміни довжини котушки на R при незмінності інших параметрів

№	l, м	R, м
1	0,01	0,044
2	0,02	0,089
3	0,03	0,133
4	0,04	0,177
5	0,05	0,221

Таблиця 10. Залежність R від заряду та маси іонів найбільш розповсюджених забрудників води при незмінності інших параметрів

Забруднюючі домішки	Заряд частинки, Кл по модулю	Маса частинки, кг	R, м
Катіони			
Сульфат, SO ₄ ²⁻	3,2·10 ⁻¹⁹	262,69·10 ⁻²⁷	0,789
Гідрокарбонат, HCO ₃ ⁻	1,6·10 ⁻¹⁹	101,29·10 ⁻²⁷	0,609
Хлорид, Cl ⁻	1,6·10 ⁻¹⁹	58,87·10 ⁻²⁷	0,044
Аніони			
Залізо, Fe ³⁺	4,8·10 ⁻¹⁹	92,74·10 ⁻²⁷	0,186
Кальцій, Ca ²⁺	3,2·10 ⁻¹⁹	67,87·10 ⁻²⁷	0,204
Калій, K ⁺	1,6·10 ⁻¹⁹	64,92·10 ⁻²⁷	0,390
Магній, Mg ²⁺	3,2·10 ⁻¹⁹	40,36·10 ⁻²⁷	0,121
Натрій, Na ⁺	1,6·10 ⁻¹⁹	38,16·10 ⁻²⁷	0,229
Аммоній, NH ₄ ⁺	1,6·10 ⁻¹⁹	29,89·10 ⁻²⁷	0,180

Пропонується впровадження установки зміни траєкторії домішок для їх видалення з основного потоку стічних вод Васильківводоканалу. Метою є очищення основного потоку рідини від мікропластику. Найвища (видалення 99.9 % мікропластику) ефективність зафіксована в очисному комплексі Kenkäaveronniemi поблизу міста Міккелі, південна Фінляндія. Його характеристики наведені в таблиці 11. Основним робочим агрегатом даного комплексу є мембранний біореактор (MBR).

Таблиця 11. Цільова ефективність очисної установки.

Назва	Пропускна здатність, м ³ /добу	Ефективність очищення, %	Наближена вартість спорудження, млн.євро	Наближена вартість експлуатації, млн євро/рік
МФД	10 000	>99.9	< 15	0,5

Таблиця 12. Технічні характеристики системи

Параметр системи	Значення
2	3
1. Вхід та вихід трубопроводу системи (діаметр), м	0.5
2. Параметри ділянки, що необхідні для розміщення системи фокусування домішок, не більше ніж, м	5x15
3. Режим роботи	Безперервний
4. Робоча пропускна здатність, м ³ /год	400
5. Максимальна пропускна здатність, м ³ /год	600
6. Добові нормативні витрати води, м ³ /добу	10 000
7. Вміст мікропластику, мг/дм ³	0.005

В межах четвертого розділу розроблено віртуальний прилад в програмному середовищі LabVIEW для знаходження траєкторій руху домішок та ларморових радіусів та виявлено лінійні залежності ларморового радіуса від швидкості потоку, маси частинки, довжин катушок.

У **П'ЯТОМУ РОЗДІЛІ** наведені дані щодо економічних характеристик лабораторного стенду та пропозиції з впровадження на очисних спорудах Васильківводоканалу.

Остаточна вартість стенду склала 5685 грн, витрати на одне випробування складають від 12,21 грн до 376,48 грн, середня вартість одного випробування складає 194.35 грн.

Сумарна орієнтовна вартість складових системи магнітного фокусування домішок (МФД) склала 752500 грн. Станом на 11.05.2018 сума відповідає 24 411.82 євро згідно курсу Нацбанку України.

Вартість даної споруди в 625 разів менша від вартості мембранного біореактора, задіяного на очисних спорудах Kenkäaveronniemi.

Таблиця 13. Вартість та термін придатності компонентів стенду

№	Найменування компоненту	Вартість, грн
1	Труба ПВХ Д160 1.5 м	280
2	Муфта ПВХ Д160	90
3	Заглушки ПВХ Д160 (2 шт)	90
4	Відвідний патрубок ПВХ Д32 20 см	59
5	Вхідний та вихідний вузли,, у складі ніпелів, контрогайок та силіконових прокладок	200
6	Мідний дріт перерізом 2.5 мм ізолюваний, 85 метрів	560
7	Насос Sprut FSP-1843 (162110)	686
8	Підвідний та відвідний шланги гідросистеми	200
9	Баки Б1 та Б2 об'ємом по 100 літрів для імітації магістралі	700
10	Трансформатор	2300
11	Система управління	420
12	Каркас установки	50
13	Розхідні матеріали (папір, скотч, ізоляційна стрічка тощо)	50
	Усього	5685

Таблиця 14. Витрати на випробовування

Назва	Витрата за 1 випробування	Вартість, грн	Витрати за одне випробовування
Вода водопровідна	0,1 м ³	14,208 за м ³	1,42 грн
Електроенергія	<2 кВт	1.68 грн за кВт	3,36 грн
Магнітний порошок	10 – 500 г	551.40 грн за кг	5,51-275.70 грн
Окис заліза (Fe ² O ³)	10 – 500 г	192 грн за кг	1,92-96 грн
Поліетилен	10 – 500 г	0 (вторсировина)	0 грн
Поліпропілен	10 – 500 г	0 (вторсировина)	0 грн

За методикою розраховано (економічний результат):

$$\Delta E = Z_{\text{до}} - Z_{\text{після}} \quad (10)$$

де $Z_{\text{до}}$, $Z_{\text{після}}$ – економічні збитки, заподіяні державі внаслідок забруднення поверхневих та підземних вод фільтратом побутових відходів, відповідно до й після впровадження МФД, тис.грн. Економічні збитки до та після впровадження МФД розраховують за формулою:

$$Z_{\text{б}} = K_{\text{кат}} \cdot K_{\text{рп}} \cdot L \cdot \sum_{i=1}^m M_{\text{фi}} \cdot \gamma_i \quad (11)$$

Таблиця 15. Наближені значення змінних

Назва величини	Значення до впровадження	Значення після впровадження
$K_{\text{кат}}$	5	5
$K_{\text{рп}}$	1,04	1,04
L	1,0	1,0
$W_{\text{ф}}$	3 650 000	3 650 000
C_i	2	0,002
γ	3300	3300
$A_i;$	0,2	0,2

$M_{\text{фi}}$ розраховується за формулою (12):

$$M_{\text{фi}} = W_{\text{ф}} \cdot C_i \cdot 10^{-6} \quad (12)$$

де $W_{\text{ф}}$ – об'єм фільтрату за розрахунковий період; у нашому випадку 3 650 000 м³/рік; C_i – середня концентрація і-тої забруднюючої речовини у фільтраті, мг/л.

γ_i розраховується за формулою (13):

$$\gamma_i = \gamma \cdot A_i; \quad (13)$$

де γ – проіндексований питомий економічний збиток від забруднення водних ресурсів; у 2011 році $\gamma = 766,96$ грн/т; A_i – безрозмірний показник відносної небезпечності і-тої забруднюючої речовини; визначається як $1/\text{ГДК}_i$.

$$M_{\text{фi1}} = 3\,650\,000 \cdot 2 \cdot 10^{-6}$$

$$\gamma_{i1} = 3300 \cdot 0,2;$$

$$Зб_{\text{до}} = 5 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 7,3 \cdot 660 = 33726;$$

$$M_{\text{фi2}} = 3\,650\,000 \cdot 0,002 \cdot 10^{-6}$$

$$\gamma_{i2} = 3300 \cdot 0,2;$$

$$Зб_{\text{після}} = 5 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 0,0073 \cdot 660 = 33,726;$$

$$\Delta E = 337260 - 337,26 = 33692,274.$$

Таким чином, результати розрахунків показують, що відвернутий економічний збиток становить 33 692 277 грн на рік.

Обчислено також загальну (абсолютну) економічну ефективність капітальних вкладень у МФД з формулою

$$E_{\text{к}} = \Delta E - З/К; \quad (14)$$

де $З$ – річні експлуатаційні витрати у МФД, тис.грн; $К$ – капітальні витрати на МФД, тис. грн.

$$E_{\text{к}} = 33692274 - 150\,000/752\,500;$$

Загальна економічна ефективність капітальних вкладень у МФД становить 44,57.

ВИСНОВКИ

В дисертації проведено науковий пошук розв'язання науково-технічної задачі мікропластикового забруднення водного середовища. Результати, отримані в ході виконання роботи:

1. На основі аналізу вибрано електромагнітний спосіб виведення домішок з потоку рідини.
2. Обрано кінчну гвинтову лінію за рівнянням Улісса Діні як тривимірне геометричне зображення траєкторій домішок в потоці води.
3. Розроблено математичну модель, відмінність якої полягає у врахуванні маси, заряду, швидкості потоку рідини, сили струму та довжини котушок електромагнітів.
4. Мінімальна кількість рівнів варіювання чинників – 3 рівні, ядром плану є ПЧЕ типу $2^3 - 3$ чинники, 15 дослідів.
5. Розроблено стенд, що дозволяє досліджувати зміну траєкторій домішок в потоці рідини під впливом електромагнітного поля.
6. Виявлено лінійні залежності ларморового радіуса від швидкості потоку, маси частинки, довжин котушок. При зміні довжини котушок від 0.01 до 0.06 м ларморовий радіус збільшується з 0.044 до 0.221 м. При зміні перпендикулярної складової швидкості від 0.5 до 2.5 м/с ларморовий радіус збільшується від 0,089 до 0,443. При зміні маси умовної частинки від $5,89E-26$ до $5,89E-22$ ларморовий радіус збільшується з 0,266 до 2656,025.
7. Очікується впровадження установки магнітного фокусування домішок на очисних спорудах Васильківводоканалу з економічним ефектом в 33 692 277 грн на рік та економічною ефективністю 44,57.

АНОТАЦІЯ

Кольцов М.А. Зниження концентрації мікропластику в стічних водах електромагнітним методом очистки – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 101 – Екологія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України. – Київ, 2018.

Дисертацію присвячено процесові очистки рідини від мікропластику за рахунок зміни траєкторій його частинок у потоці.

У роботі розроблено математичну модель, відмінність якої полягає у врахуванні маси, заряду, швидкості потоку рідини, сили струму та довжини котушок електромагнітів та виявлено залежності ларморового радіусу від даних параметрів. Встановлено, що зі збільшенням сили струму ларморовий радіус лінійно зменшується, а зі збільшенням маси, перпендикулярної складової швидкості та довжини магнітного поля – лінійно збільшується.

Проблема очищення води гостро стоїть перед людством вже зараз і з роками буде ставати лише більш актуальною. Одним з нових антропогенних забрудників є пластик, який під дією вивітрювання деградує до фракції мікропластику. Розмір частинок мікропластику – не більше 5 мм. У даній роботі проведено науковий пошук фізичних методів очистки води від мікропластику. Створено математичну модель та проведено моделювання магнітних режимів фокусування потоку домішок в рідині. Розроблено дослідницький стенд фокусування домішок в потоці рідини для видалення мікропластикових домішок та обґрунтування його робочих режимів. Одержано залежності між робочими параметрами магнітного модулю фокуруючої установки (сила струму, кількість витків, взаємне розташування котушок) та фізико-хімічними характеристиками забрудників.

Практичне значення роботи полягає в розробці стенду для експериментального дослідження впливу електромагнітного поля на забрудники та домішки у потоці води; очікуваному впровадженні системи магнітного фокусування домішок після моделювання і вибору режимів експлуатації експериментальним шляхом; використання розроблених матеріалів в якості учбових матеріалів при викладанні курсу «Фізичні методи очистки водних середовищ».

Ключові слова: очищення води, водні ресурси, мікропластик, фізичні методи, електромагнітне поле, сила Лоренца, Ларморова прецесія, конус Діні.

АННОТАЦИЯ

Кольцов М.А. Снижение концентрации микропластика в сточных водах электромагнитным методом очистки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени магистра по специальности 101 - Экология. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины. - Киев, 2018.

Диссертация посвящена процессу очистки жидкости от микропластика путём изменения траекторий его частиц в потоке.

В работе разработана математическая модель, отличие которой заключается в учете массы, заряда, скорости потока жидкости, силы тока и длины катушек электромагнитов, а также выявлены зависимости ларморова радиуса от данных параметров. Установлено, что с увеличением силы тока ларморов радиус линейно уменьшается, а с увеличением массы, перпендикулярной составляющей скорости и длины магнитного поля - линейно увеличивается.

Проблема очистки воды остро стоит перед человечеством уже сейчас и с годами будет становиться только более актуальной. Одним из новых антропогенных загрязнителей является пластик, который под действием выветривания деградирует до фракции микропластика. Размер частиц микропластика - не более 5 мм. В данной работе проведен научный поиск физических методов очистки воды от микропластика. Создана математическая модель и проведено моделирование магнитных режимов фокусировки потока примесей в жидкости. Разработан исследовательский стенд фокусировки примесей в потоке жидкости для удаления микропластиковых примесей и обоснование его рабочих режимов. Получены зависимости между рабочими параметрами магнитного модуля фокусирующей установки (сила тока, количество витков, взаимное расположение катушек) и физико-химическими характеристиками загрязнителей.

Практическое значение работы состоит в разработке стенда для экспериментального исследования влияния электромагнитного поля на загрязнители и примеси в потоке воды; ожидаемом внедрении системы магнитного фокусировки примесей после моделирования и выбора режимов эксплуатации экспериментальным путем; использования разработанных материалов в качестве учебных материалов при преподавании курса «Физические методы очистки водных сред».

Ключевые слова: очистка воды, водные ресурсы, микропластик, физические методы, электромагнитное поле, сила Лоренца, Ларморова прецессия, конус Дини.

ABSTRACT

M. Koltsov. Decreasing of microplastic concentration in waste waters via the electromagnetic water purification. – Manuscript.

The thesis is devoted to the process of liquid microplastic treatment through the alternation of particle's routes in the stream.

As a result there was developed a mathematical model. The main difference is the consideration of mass, charge, flow rate, amperage and length of the electromagnetic coils, as well as their influence on the Larmor radius. Determined, that increasing amperage lineary decreases Larmor radius, and increasing mass, perpendicular velocity component and length of magnetic field linearly increases it.

Water purification problem is crucial for the humanity nowadays and will become even more important in the future. One of the newest anthropogenic pollutants is plastic, which degrades to the fraction of microplastic due to weathering. The particle size of the microplastic is less than 5 mm. In this paper, a scientific search for physical methods of water purification from microplastic was conducted. The mathematical model was created and the magnetic regimes of impurities flow focusing in a liquid were simulated. A research stand for focusing impurities in the liquid flow for the removal of microplastic impurities

and justification of its operating conditions have been developed. Dependences between the operating parameters of the magnetic module of the focusing unit (current strength, number of turns, mutual arrangement of the coils) and physicochemical characteristics of the pollutants were obtained.

The practical significance of the work consists in the developing a laboratory stand for the experimental study of the electromagnetic field influence on contaminants and impurities in the water flow; the expected introduction of a magnetic impurity focusing system after modeling and experimental selection of operating modes; use of the developed materials during a teaching of the course "Physical methods of water treatment".

Keywords: water treatment, water resources, microplastics, physical methods, electromagnetic field, Lorentz force, Larmor precession, Dini cone.

Кольцов Михайло Андрійович

**ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ МІКРОПЛАСТИКУ В СТІЧНИХ ВОДАХ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МЕТОДОМ ОЧИСТКИ**

101 - Екологія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
магістр

