e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

STUDY OF SAPROPEL PROCESSING IN A DMRR

I. Tsiz*, A. Buchak

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
sapropel,
humic fertilizers,
disperser-mixer,
rotor,
annular channel,
reagent,
Taylor vortices

Article history:
Received 15.09.2026
Reviewed 28.09.2026
Approved 30.10.2026

*****Corresponding author:***
tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

ABSTRACT

Organic sapropel is a high-quality source for replenishing soil humus and proves highly effective when applied to degraded or industrially contaminated soils. The specific nature of sapropel deposit formation results in a dispersed structure with a water content ranging from 92% to 98%. Dehydrating sapropel to a moisture level suitable for use as fertilizer requires significant energy expenditure. An alternative approach is to utilize sapropel at its natural extraction moisture content. One method for utilizing organic sapropel at natural moisture levels involves treating it with a dilute alkali (or acid) solution to produce humic organo-mineral fertilizers. To ensure an effective reaction between the sapropel and the alkali (or acid) solution, a DMRR design has been developed that facilitates micro-mixing of the reactants within the annular channel formed between the rotor and the stator. The aim of this study is to theoretically investigate the processes governing parameter fluctuations in reactant flows within the annular channel of the DMRR. An analysis of how annular channel parameters and reactant properties influence flow regimes revealed that a turbulent flow regime cannot occur within the mixing zone. Consequently, the mixing process can be intensified by employing a rotating rotor, which induces flow instability in the radial direction and the formation of Taylor vortices. It has been established that Taylor vortices will form in the mixing zone of the annular channel when the rotor diameter exceeds 0.04 m and the rotational speed is greater than 200–250 rad/s. Under these conditions, the dimensionless gap between the rotor and the stator must not be less than 0.05. The propagation speed of disturbances is primarily influenced by the rotor's angular velocity and the viscosity of the fluid being processed. The rotor's angular velocity has a particularly significant effect in the zone where the flow meets the rotor surface.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2336

To cite this article:
Tsiz, I., & Buchak, A. (2026). Study of sapropel processing in a DMRR. *Agricultural Machines*, *52*, 118-130. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2336

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 631.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ САПРОПЕЛЮ У ДЗОР

І.Є. Цизь, А.Т. Бучак

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
сапропель,
гумінові добрива,
диспергатор-змішувач,
ротор,
кільцевий канал,
реагент,
вихори Тейлора.

Історія публікації:
Отримано 15.09.2026
Прорецензовано 28.09.2026
Затверджено до друку 30.10.2026

Автор для листування:*
tsizigor@lutsk-ntu.com.ua

АНОТАЦІЯ

Органічний сапропель є якісним джерелом поповнення гумусу ґрунту та забезпечує високу ефективність під час застосування на деградованих і техногенно забруднених ґрунтах. Особливість формування покладів сапропелю забезпечує їх дисперсну будову із вмістом води у межах 92…98 %. Процес зневоднення сапропелю до вологості, яка забезпечує його використання у якості добрива, вимагає значних затрат енергії. Альтернативою є використання сапропелю із вологістю, яку він має під час добування. Способом використання органічного сапропелю природної вологості є його обробка слабким розчином лугу (кислоти) та отримання гумінових органо-мінеральних добрив. Для забезпечення якісної реакції між сапропелем та розчином лугу (кислоти) розроблена конструкція ДЗОР, яка забезпечує мікроперемішування реагентів у кільцевому каналі між ротором та статором. Метою дослідження є теоретично дослідити процеси формування флуктуацій параметрів потоків реагентів у кільцевому каналі ДЗОР. Дослідження впливу параметрів кільцевого каналу та властивостей реагентів на режими їх руху виявили, що для зони змішування виникнення турбулентного режиму руху є неможливим. Тому інтенсифікація процесу перемішування реагентів можлива шляхом використання обертового ротора, що забезпечує втрату стійкості потоку у радіальному напрямку та виникнення вихорів Тейлора. Встановлено, що у зоні змішування кільцевого каналу виникатимуть вихори Тейлора за діаметра ротора більшого від 0,04 м та частота його обертання > 200...250 рад/с. При цьому безрозмірна величина зазору між ротором та статором не повинна бути меншою за 0,05. На швидкість поширення збурень визначальний влив має кутова швидкість обертання ротора та в'язкість рідини, яка обробляється. Особливо значущим є вплив кутової швидкості обертання ротора у зоні примикання потоку до поверхні останнього.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2336

Цитувати цю статтю:
Цизь, І. Є., & Бучак, А.Т. (2026). Дослідження процесів обробки сапропелю у ДЗОР. *Сільськогосподарські машини*, *52*, 118-130. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2336

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Особливість формування покладів сапропелю забезпечує їх дисперсну будову із вмістом води у межах 92…98 % *(Шевчук, 1996, Tsiz et al., 2023)*. Процес зневоднення добутого сапропелю до вологості, яка забезпечує його використання у якості добрива, вимагає значних затрат енергії та використання відповідної техніки та технологій. Альтернативою є використання сапропелю із вологістю, яку він має під час добування.

Наявність у сапропелі органічного типу гумінових речовин визначають його радіопротекторні, акумулятивні, транспортні, регулювальні та фізіологічні властивості *(Zarina et al., 2023; Grantina-Ievina et al., 2014; Edesi et al., 2020)*. Дослідженнями *(Edesi et al., 2020, Stankevica et al., 2013, Stankevica et al., 2014)* виявлено високу ефективність його застосування на деградованих та забруднених ґрунтах. Для активації гумінових речовин органічного сапропелю найбільшого поширення набула технологія виготовлення гумінових органо-мінеральних добрив (ГОМД), в основі якої лежить властивість гумінових кислот (ГК) взаємодіяти із слабкими розчинами лугів, мінеральних кислот та їх солей з утворенням солей гумінових кислот – так званих, гуматів. Дослідженнями також встановлено, що використання свіжо добутого сапропелю природної вологості, який не зазнав окислення киснем повітря забезпечу максимальне виділення ГК *(Цизь & Величко, 2007)*. Тому технологія виробництва ГОМД на основі сапропелю дозволяє його використання із природною вологістю.

Виробництво і використання ГОМД здійснюється в Україні та за кордоном. Вітчизняні виробники пропонують ГОМД на основі сапропелю під назвою «Сапропель», «Гумат екстра» (фірма Біо Агро Захист), «Гумат калію» (компанії Українська органіка), “Сапрогум” («Зендер Україна») *(Бортнік et al., 2006)* тощо. Широкий асортимент гумінових добрив на основі різних органічних речовин пропонує німецька фірма umintech.

Основною технологічною складовою під час виділення (екстрагування) ГК є проведення якісної реакції, тобто досягнення умов за яких прореагує максимальна кількість органічної речовини з екстрагентом. Під час виготовлення вказаних ГОМД бажаний результат досягають високими швидкостями перемішування за підвищених температур та тисків у диспергаторах-змішувачах періодичної дії *(Schirmer et al., 2021)*.

Колоїдна будова сапропелю утруднює виділення з нього ГК. Фізично зв’язана вода утворює навколо колоїдних частинок водні оболонки, які перебувають під впливом поверхневих сил натягу. Тому під час механічного перемішування та подрібнення слід прагнути до неперервної взаємодії мікрооб’ємів реагенту та органічної речовини сапропелю для виділення максимальної кількості ГК. Такий результат можна досягти у диспергаторах-змішувачах неперервної дії, які бувають статичними та з механічним приводом *(Ghanem et al., 2014, Riera et al., 1991, Polyakovs et al., 2013)*. Статичний змішувач має будову порожнистої труби або каналу із змонтованими у внутрішній її порожнині спеціальними перегородками. Функції перегородок полягають у зміні структуру потоку з метою утворення вторинних поперечних потоків, які посилюють масо- і теплообмін у поперечному перерізі. Завдяки цьому статичні змішувачі ділять і перерозподіляють лінії потоку використовуючи лише енергію потоку рідини *(Ghanem et al., 2014, Thakur et al., 2003)*. У диспергаторах-змішувачах з механічним приводом наявний обертовий ротор різноманітної конструкції, а також спеціальної форми статор. Завдяки руху потоку рідини у зазорі між ротором та статором і відбувається її диспергування *(Ghanem et al., 2014, Polyakovs et al., 2013)*. Диспергатори-змішувачі із високим ступенем зсуву виробляє компанія Chemineer. У диспергаторах-змішувачах для виготовлення водно-вугільної суспензії інтенсифікація процесу диспергування досягається завдяки кавітаційному ефекту *(Polyakovs et al., 2013)*. Робота цих диспергаторів-змішувачів передбачає попереднє змішування реагентів.

Для забезпечення якісної реакції між сапропелем та розчином лугу (кислоти) нами розроблена конструкція диспергатора-змішувача з обертовим ротором (ДЗОР), який не вимагає попереднього змішування реагентів *(Цизь & Величко, 2008)*. Дана конструкція забезпечує мікроперемішування сапропелю природної вологості ($W = 94 - 96$ %) із розчином лугу у кільцевому каналі, який формується у зазорі між ротором та статором. Мікорперемішування реагентів у кільцевому каналі зумовлено рядом складних гідродинамічних процесів, які спричинені дією відцентрової сили, зсувом шарів в осьовому та меридіальному напрямках через градієнт швидкості та наявністю двох шарів рідин із різними фізико-реологічними властивостями.

Мета дослідження – теоретично дослідити процеси формування флуктуацій параметрів потоків реагентів у кільцевому зканалі ДЗОР.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Робочий процес запропонованого диспергатор-змішувача полягає у тому, що розчин лугу подається каналом 1 у ділянку АВ каналу 4 та розділяється на два потоки товщиною h (**рис.1**). Кожен із потоків зустрічається відповідно у точці А та В із потоком сапропелю, що подається через канали 2. Для створення відцентрової сили в горизонтальній площині канали 2 вмонтовані у обертовий ротор. Зважаючи на це відрізки АВ є частиною твірної циліндричного ротора. Завдяки коливанням параметрів потоків обох реагентів на ділянках СА і BD кільцевого каналу має місце інтенсивне взаємне диспергування потоків у горизонтальному та тангенціально напрямку та відбувається їх перемішування. Готова суміш відводиться через канали 3.

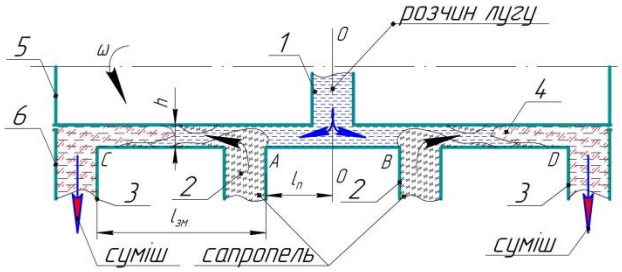


Рис. 1 - Схема робочого процесу змішування сапропелю із розчином лугу: 1 – канал подачі лугу; 2 – канал подачі сапропелю; 3 – канали відведення суміші; 4 – змішувальний канал; 5 – ротор; 6 – статор

Наведений на **рис. 2** ДЗОР для отримання ГОМД містить у роторі чотири ряди отворів для подачі сапропелю та два ряди отворів у статорі для подачі розчину лугу. Завдяки цьому формується чотири кільцевих змішувальних канали довжиною $l_{з.м}$. Для відведення суміші у статорі наявні три ряди отворів та колектор суміші.

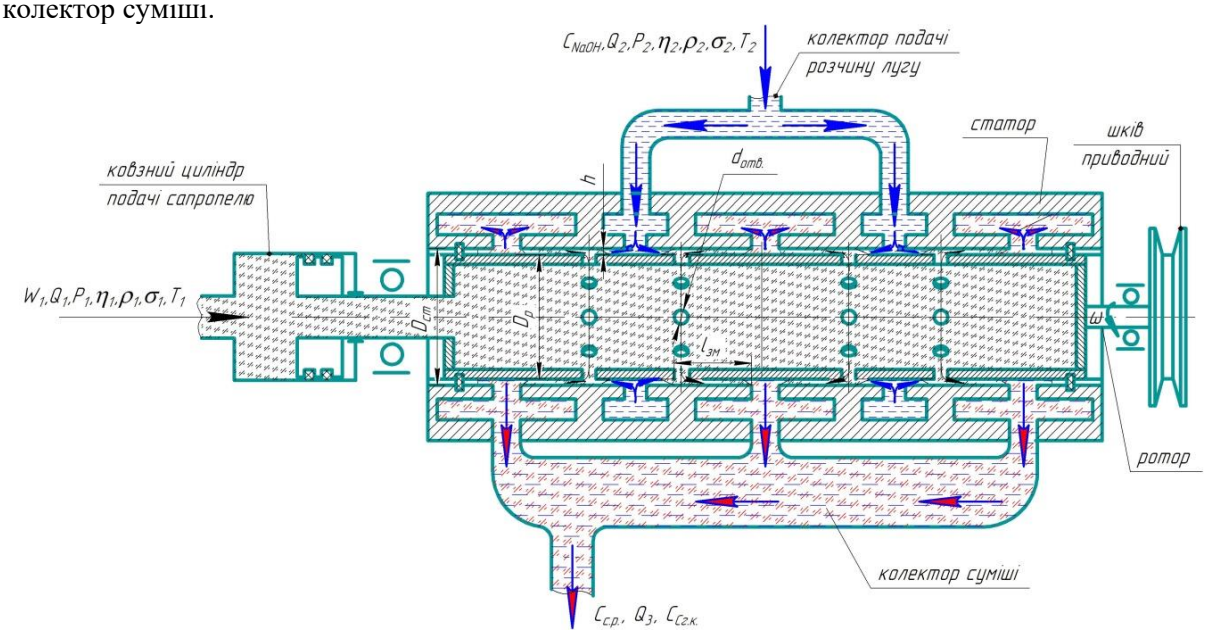


Рис. 2 – Функціональна схема ДЗОР для отримання ГОМД на основі сапропелю

Надалі у залежностях для параметрів потоків реагентів використовуватимемо індекс «1» для сапропелю, а індекс «2» для розчину лугу. Тому потік сапропелю надходить до ротора через ковзний циліндр із параметрами: вологість W_1, витрата Q_1, тиск P_1, динамічна в'язкість η_1, густина ρ_1, коефіцієнт поверхневого натягу σ_1 та температура T_1. Вхідний потік розчину лугу характеризують

такі параметри: концентрація лугу у розчині C_{NaOH}, витрата Q_2, тиск P_2 динамічна в'язкість η_2, густина ρ_2, коефіцієнт поверхневого натягу σ_2 та температура T_2. Отримана суміш має параметри: продуктивність ДЗОР Q_3; вміст сухої речовини $C_{с.р.}$; вміст вуглецю гумінових кислот $C_{Сг.к.}$. На **рис. 2** відображено функціональну схему ДЗОР із двома секціями змішування. У подальших теоретичних дослідженнях зупинимось на аналізі процесів у одній секції.

Теоретичні дослідження процесів формування флуктуацій параметрів потоків реагентів базувалися на основних положеннях гідродинаміки, вищої математики та фізики. Аналіз математичних моделей та графічні побудови здійснювалися в середовищі програми Mathcad.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У випадку осьового руху в'язких рідин трубопроводами основною причиною виникнення флуктуації у паралельних шарах рідини є зростання напружень Рейнольдса більше від величини сил внутрішнього в'язкого опору рідини. У цьому випадку відбувається перехід від ламінарного режиму руху рідини до турбулентного. Для оцінки такого явища використовують безрозмірну характеристику – число Рейнольдса. Із теорії руху в'язких рідин відома загальна формула для його розрахунку *(Prandtl, 1934, Мандрус et al., 1995)*

$$Re = \frac{4 \cdot \rho \cdot R \cdot \bar{u}}{\eta}, \tag{1}$$

де η - динамічна в'язкість рідини, Па·с; R - гідравлічний радіус каналу у якому рухається рідина, м; ρ - густина рідини, кг/м^3; $\bar{u}$ - середня (ефективна) швидкість руху рідини у каналі, м/с.

Для оцінки можливості виникнення процесу перемішування реагентів за рахунок турбулентного режиму руху спочатку розглянемо особливості руху рідини на окремих ділянках вздовж осі ротора для однієї секції ДЗОР за умови, що обертання ротора відсутнє. Вважатимемо, що із певним наближенням, потік розчину лугу входячи через кільцевий канал 1 (**рис. 1**) розподіляється рівномірно на два потоки відносно осі симетрії ОО. У такому випадку процеси, які відбуваються у праву та ліву сторону від осі ОО вважатимемо симетричними. Тому у кільцевому каналі на ділянці між перерізами по осі ОО та точці А матимемо рух розчину лугу (надалі реагент 2). Витрата реагента 2 на цій ділянці буде рівна половині витрати даного реагента 2, що припадає на одну секцію $Q_{2сек}/2$. А на ділянці між перерізами у точці А та точці С матимемо рух суміші сапропелю (надалі реагент 1) та реагента 2. При цьому витрата реагента 1 на даній ділянці також складатиме $Q_{1сек}/2$. Загальна витрата на цій ділянці буде рівна половині продуктивності секції за готовою сумішшю $Q_{3сек}/2$. Тоді використавши $m = Q_{2сек}/Q_{1сек}$ - вміст реагентів маємо

$$Q_{3сек} = Q_{1сек} \cdot (1 + m), \tag{2}$$

У той же час важливою характеристикою ДЗОР є час перебування частинки реагенту у зоні змішування $t_{зм}$. Величина цього часу визначається саме часом необхідним якісної взаємодії між реагентами і визначається особливістю конструкції змішувача та швидкістю протікання хімічних реакцій між компонентами.

Увівши безрозмірну величину довжини зони змішування $l_1 = l_{зм}/D_p$ встановити середню швидкість потоку суміші реагентів у зоні змішування

$$\bar{u}_{зм} = \frac{l_1 \cdot D_p}{t_{зм}}, \tag{3}$$

У такому випадку середня реагента 2 на ділянці ОА складатиме

$$\bar{u}_0 = \frac{l_1 \cdot D_p \cdot m}{t_{зм} \cdot (1 + m)}. \tag{4}$$

Увівши безрозмірну величину зазору між ротором та статором $h_0 = h/D_p$ та врахувавши значення гідравлічного радіусу кільцевого каналу і вираз (3.4) для ділянки ОА отримаємо

$$Re = \frac{2 \cdot \rho \cdot h_0 \cdot l_1 \cdot D_p^2 \cdot m}{\eta \cdot t_{зм} \cdot (1+m)}. \quad (5)$$

Оскільки для обробки сапропелю під час виділення гумінових кислот використовують 1-2 % розчин лугу (кислоти) то вважатимемо, що даний реагент має значення коефіцієнта динамічної в'язкості який рівний його значенню для води.

У той же час згідно експериментальних досліджень *(Хомич et al., 2013)* встановлено, що реагент 1 (органічний сапропель) належить до групи псевдопластичних матеріалів для яких в'язкість змінюється за степеневим законом *(Nouri & Whitelaw, 1994; Macosko, 1994)*

$$\tau = K \cdot u^n, \quad (6)$$

де τ - дотичне напруження; K - коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт консистенції); u - швидкість деформації шарів; $n < 1$ - показник течії псевдопластичної рідини.

Оскільки коефіцієнт в'язкості для такої рідини є не постійною величиною, а залежить від швидкості деформації шарів то вводять ефективну (видиму) в'язкість, яка визначатиметься залежністю

$$\eta_{еф.} = K \cdot u^{n-1}. \quad (7)$$

За рахунок змішування між реагентами відбуватиметься зниження вмісту сухої речовини сапропелю та очевидно відбуватимуться зміна значень коефіцієнтів, які входять до рівняння (6) від початкових значень для реагенту 1. Але для оцінки можливого режиму руху число Рейнольдса для ділянки АС визначатиметься залежністю

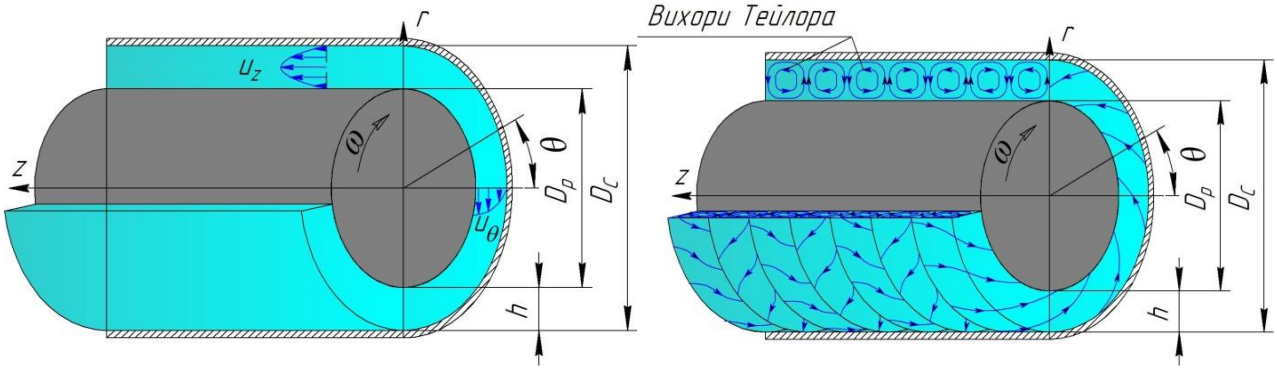
$$Re = \frac{2 \cdot \rho \cdot h_0 \cdot D_p^{3-n}}{K} \cdot \left(\frac{l_1}{t_{зм}} \right)^{2-n} \quad (8)$$

Дослідження впливу параметрів ДЗОР та властивостей реагентів на режими їх руху у кільцевому каналі показують, що для зони змішування виникнення турбулентного режиму руху є неможливим. На ділянці ОА кільцевого каналу можливий турбулентний режим рух реагента 2 за значень часу змішування $t_{зм}$, що не перевищує 0,5...0,7 с, діаметра ротора $D_p > 0,07$ м та зазору $h_0 = 0,12...0,15$.

Досягти інтенсифікації процесу перемішування реагенті можна завдяки наданню ротору обертового рух. Рівняння, що визначає сумарну швидкість потоку рідини між обертовим ротором та статором у циліндричні системі координат (рис. 3, а) матиме вигляд

$$u = u_z(r) \cdot e_z + u_\Theta(r) \cdot e_\Theta, \quad (9)$$

де $u_z(r)$ - осьова швидкість рідини спричинена градієнтом тиску; $u_\Theta(r)$ - меридіальна швидкість рідини спричинена обертанням внутрішнього циліндра (ротора); e_z та e_Θ - одиничні вектори.



а б

Рис 3 - Схема режимів руху рідини у кільцевому зазорі за обертання внутрішнього циліндра

Проте за рахунок зростання частоти обертання ротора у кільцевому зазорі може виникнути флуктуації параметрів потоку рідини. Поява таких відхилень визначається умовою Кармана *(Stuart, 1986)* (**рис. 4**)

$$\begin{cases} \left(r_A \cdot u_{\Theta A}\right)^2 < \left(r_B \cdot u_{\Theta B}\right)^2 \Rightarrow \textit{потік стабільний;} \\ \left(r_A \cdot u_{\Theta A}\right)^2 > \left(r_B \cdot u_{\Theta B}\right)^2 \Rightarrow \textit{потік нестабільний.} \end{cases} \tag{10}$$

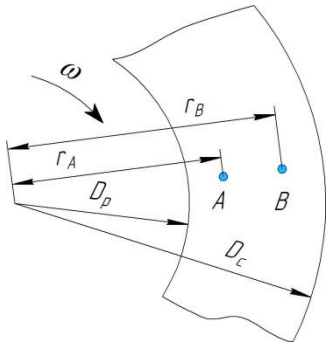


Рис. 4 - Схема до умови Кармана *(Stuart, 1986)*

Фізичний зміст цієї умови полягає у тому, що у випадку коли деякий елементарний об'єм потоку рідини що знаходиться у точці А та рухаючись тангенціально із меридіальною швидкістю $u_{\Theta A}$ зміщається до точки потоку В то можна вважати, що цей об'єм прибуває у точку В маючи нову меридіальну швидкість $u_{\Theta A} \cdot \left(\frac{r_A}{r_B}\right)$. За такої швидкості на об'єм діятиме відцентрова сила

$$F'_A = \frac{\rho \cdot u_{\Theta A}^2 r_A^2}{r_B^3}. \tag{11}$$

Але оскільки меридіальна швидкість елементарного об'єму потоку у точці В рівна $u_{\Theta B}$ то на нього діятиме відцентрова сила

$$F_B = \frac{\rho \cdot u_{\Theta B}^2}{r_B}, \tag{12}$$

У такому випадку коли $F'_A < F_B$ то елементарний об'єм повернеться у початкове положення і потік залишиться стабільним у іншому випадку він продовжить свій рух вздовж радіуса та стабільність потоку буде втрачена. Виконання умови 1 системи (10) можливе лише у випадку $u_{\Theta A} << 1$ або обертання зовнішнього циліндра, що не відповідає умовам роботи ДЗОР.

Втрата стійкості потоку спричинює появу його циркуляцій, які вперше описав G.I. Taylor, а це явище отримало назву вихорів Тейлора *(Taylor, 1923)*. У випаду втрати стійкості потоку та виникнення вихорів Тейлора (**рис. 3, б**) рівняння, що визначає сумарну швидкість потоку рідини між обертовим ротором та статором у циліндричні системі координат набере вигляду

$$u = u_z\left(r,z\right) \cdot e_z + u_\Theta\left(r,z\right) \cdot e_\Theta + u_r\left(r,z\right) \cdot e_r. \tag{13}$$

Класичний підхід до теоретичного дослідження даного явища полягає поєднанні розгляду процесів у каналі між плоскими пластинами за наявності відносного їх руху, який отримав назву каналу Куета, та у кільцевому каналі за умови відсутності обертання яке називають задачею *Пуазейля (Wroński & Jastrzębski, 1990; Di Prima & Swinney, 1981; Stuart, 1958)*. Для такого випадку використовують рівняння Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності *(Peng & Zhu, 2004)*

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \left(\nabla \cdot u\right) \cdot u\right) = \nabla p + \nabla \cdot \tau; \tag{14}$$

$$\nabla \cdot u = 0, \tag{15}$$

де $\nabla \cdot u$ - дивергенція вектора швидкості; ∇p - градієнти тиску; τ - тензор напружень.

З урахуванням формули (6) вирази для тензора напружень за окремими ділянками ДЗОР складуть:

- ділянка ОА (для реагента 2)

$$\tau = 2 \cdot \eta \cdot D, \tag{16}$$

- ділянка АС (зона змішування реагентів 1 та 2)

$$\tau = 2 \cdot K \cdot u^{n-1} \cdot D, \tag{17}$$

де D - тензор складових швидкості деформації.

Тоді у циліндричні системі координат для ділянки ОА рівняння (14) та (15) матимуть вигляд [*Stuart, 1958*]

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r \cdot u_r\right)}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\Theta}{\partial \Theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0, \tag{18}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\Theta}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \Theta} - \frac{u_\Theta^2}{r} + u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \eta\left(\nabla^2 u_r - \frac{u_r^2}{r} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial u_\Theta}{\partial \Theta}\right); \tag{19}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_\Theta}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_\Theta}{\partial r} + \frac{u_\Theta}{r}\frac{\partial u_\Theta}{\partial \Theta} + \frac{u_r u_\Theta}{r} + u_z\frac{\partial u_\Theta}{\partial z}\right) =$$

$$= -\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \Theta} + \eta\left(\nabla^2 u_\Theta - \frac{u_\Theta}{r^2} + \frac{2}{r^2}\frac{\partial u_r}{\partial \Theta}\right); \tag{20}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\Theta}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \Theta} + u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta\nabla^2 u_z. \tag{21}$$

У (19)-(21) оператор Лапласа

$$\nabla^2 = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \Theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \tag{22}$$

Для ділянки АС (зона змішування реагентів 1 та 2) рівняння нерозривності лишається таким же а (14) з урахуванням того, що оператор $\nabla\left(2 \cdot K \cdot u^{n-1} \cdot D\right)$ не можна спростити до оператора Лапласа то запишемо так

$$\rho\left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\Theta}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \Theta} - \frac{u_\Theta^2}{r} + u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \left(\nabla \cdot \tau\right)_r; \tag{23}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_\Theta}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_\Theta}{\partial r} + \frac{u_\Theta}{r}\frac{\partial u_\Theta}{\partial \Theta} + \frac{u_r u_\Theta}{r} + u_z\frac{\partial u_\Theta}{\partial z}\right) = -\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \Theta} + \left(\nabla \cdot \tau\right)_\Theta; \tag{24}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\Theta}{r}\frac{\partial u_z}{\partial \Theta} + u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\nabla \cdot \tau\right)_z. \tag{25}$$

У подальшому до наведених рівнянь (18) - (25) підставляють вирази для компонент вектора швидкості та тиску, які враховують лінійні або нелінійні збурення *(Stuart, 1958; Stuart, 1986; Taylor, 1923; Di Prima & Swinney, 1981)*

$$u = u_0 + \varepsilon \cdot u'; \tag{26}$$

$$p = P + \varepsilon \cdot p', \tag{27}$$

де $\varepsilon << 1$ безрозмірний параметр (параметр амплітуди збурень); u' та p' - збурення поля швидкості та тиску відповідно.

Вирази (26) та (27) у рівняннях (18) - (25) дають члени першого ε та другого порядку ε^2. Оскільки $\varepsilon << 1$ то є праці у яких члени другого порядку не враховуються. За результатами таких досліджень отримана формула для визначення безрозмірного параметра, яким оцінюється можливість появи вихорів Тейлора (*Taylor, 1923*, *Stuart, 1986*). У розглядуваному випадку ДЗОР форму для розрахунку числа Тейлора матиме вигляд

$$T = \frac{\omega_p \cdot \rho}{\eta_{еф.}} \sqrt{\frac{D_p \cdot h^3 + h^4}{2}}, \quad (28)$$

або

$$T = \frac{\omega_p \cdot \rho \cdot D_p^2}{\eta_{еф.}} \sqrt{\frac{h_0^3 + h_0^4}{2}}. \quad (29)$$

Оцінкою виникнення вихорів є критичне значення числа Тейлора $T_{кр.} = 41,3$. Тому явище виникнення вихорів Тейлора у кільцевому зазорі ДЗОР визначається умовою

$$T = \frac{\omega_p \cdot \rho \cdot D_p^2}{\eta_{еф.}} \sqrt{\frac{h_0^3 + h_0^4}{2}} \geq 41,3. \quad (30)$$

Для ділянки ОА кільцевого зазору ДЗОР у вираз (30) замість $\eta_{еф.}$ слід підставляти коефіцієнт динамічної в'язкості води η, а для ділянки АС – вираз (7). У якості швидкості деформації шарів будемо використовувати їх швидкість у коловому русі, а тому отримаємо таку умову

$$T = \frac{\rho \cdot \omega_p^{2-n} \cdot D_p^{3-n}}{K \cdot 2^{1.5-n}} \sqrt{h_0^3 + h_0^4} \geq 41,3. \quad (31)$$

На основі побудованих за формулами (30) та (31) графічних залежностей (**рис. 5**) видно, що у зоні змішування тобто на ділянці АС кільцевого каналу виникатимуть вихори Тейлора коли діаметр ротора буде більшим за 0,04 м, а його частота обертання більшою від 200...250 рад/с. При цьому безрозмірна величина зазору між ротором та статором не повинна бути меншою за 0,05. У зоні подачі реагента 2 тобто на ділянці ОА кільцевого зазору за таких параметрів також будуть формуватись флуктуації параметрів потоку спричинені вихорами Тейлора.

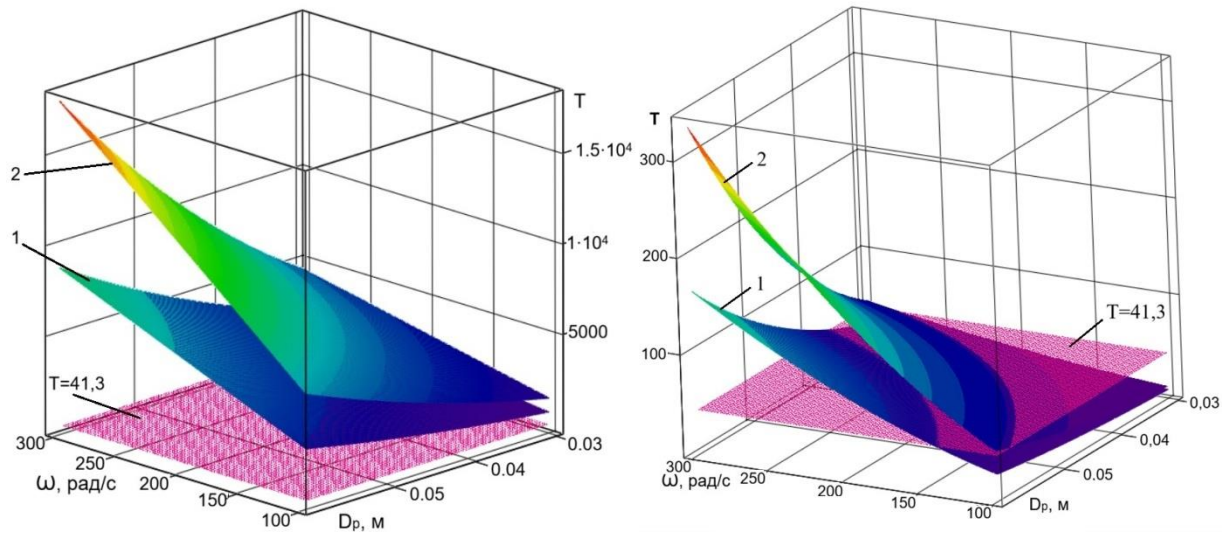


Рис. 5 – Залежність числа Тейлора T для ділянки ОА (а) та АС кільцнвого каналу ДЗОР від діаметра ротора D_p та кутової швидкості його обертання ω_p: 1 – $h_0 = 0,05$; 1 – $h_0 = 0,08$

Отримані результати вказують, що за визначених значень парметрів ДЗОР у ньому виникатимуть процеси завихрення потоків спричинені вихорами Тейлора. Проте для клікісної оцінки інтенсивності процесу змішування реагентів за рахунок флуктуацій їх потоку у клільцевому зазорі викортстаємо швидкість поширення збурень потоку спричинених вихорами Тейлора. Формула для

розрахунку такої швидкості отримана за рахунок врахування саме членів другого порядку ε^2 у дослідженнях (*Stuart, 1958*, *Stuart, 1986*), яка для розглядуваного випадку ДЗОР матиме вигляд

$$u'_{\Theta} = \left(\frac{\rho \cdot a \cdot D_p^3 \cdot \omega_p^2 \cdot h_0}{4 \cdot \eta_{еф.}} \right) \cdot S(\zeta), \tag{32}$$

де a - амплітуда коливань швидкості u'_{Θ}; $S(\zeta)$ - функція, що залежить від безрозмірної координати ζ точок завихреності збурення вздовж осі r у циліндричній системі координат.

Функцію $S(\zeta)$ Stuart J.T. (*Stuart, 1958*, *Stuart, 1986*) пропонує встановлювати за формулою

$$S(\zeta) = -\frac{1}{8\pi^2} + \frac{1}{\pi^4} + \frac{\zeta}{2\pi^2} + \frac{cos(\pi \cdot \zeta)}{4\pi^3} + \frac{A}{2\pi^3} \cdot \left(1 + 0{,}2 \cdot cos(2\pi \cdot \zeta)\right) - \\ - \frac{1}{\pi^4} \left(1 + \frac{2\pi}{5}\right) \cdot \frac{cosh(\pi \cdot \zeta)}{cosh(\pi / 2)} \tag{33}$$

де A - емпіричний коефіцієнт, який згідно (*Stuart, 1958*) складає $A = 0{,}02686$.

Зв'язок між координато r та безрозмірною координатою ζ має такий ивгляд

$$r = r_0 + \zeta \cdot h. \tag{34}$$

Оскільки для розглядуваного випадку кільцевого зазору ДЗОР маємо

$$r_0 = \frac{D_p + h}{2}. \tag{35}$$

То з урахування безрозмірного зазору h_0 отримаємо

$$r = D_p \cdot h_0 \left(\frac{1 + h_0}{2h_0} + \zeta \right). \tag{36}$$

У такому випадку значення безрозмірної координати знаходиться у межах від $-\frac{1}{2}$ до $+\frac{1}{2}$, і за $\zeta = -\frac{1}{2}$ $r = \frac{D_p}{2}$, а за $\zeta = \frac{1}{2}$ $r = \frac{D_c}{2}$.

З метою розрахунку амплітуди коливань швидкості u'_{Θ} у (*Stuart, 1958*, *Stuart, 1986*) для випадку коли хвильове число рівне π наведена така формула

$$a = \frac{2{,}329}{Re_к} \sqrt{1 - \frac{T_{кр.}^2}{T^2}}, \tag{37}$$

де $Re_к$ - число Рейнольдля для колового руху рідини, яке для розглядуваного випадку кільцевого зазору ДЗОР визначатиметься залежністю

$$Re_к = \frac{\omega_p \cdot D_p^2 \cdot h_0 \cdot \rho}{2 \cdot \eta_{еф.}}. \tag{38}$$

Після підстановки (37) з урахуванням (38) та (29) у (32) маємо

$$u'_{\Theta} = 2{,}329 \cdot S(\zeta) \cdot \sqrt{\left(D_p^2 \cdot \omega_p^2 - \frac{2 \cdot \eta^2_{еф.} \cdot T_{кр.}^2}{\rho^2 \cdot D_p^2 \cdot \left(h_0^3 + h_0^4\right)} \right)}. \tag{39}$$

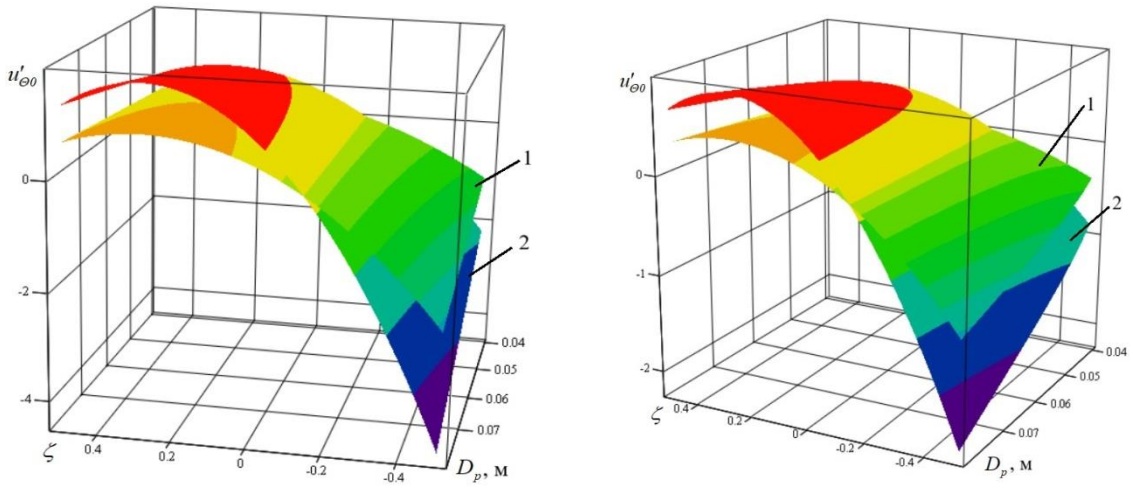
Аналогічно, як і для числа Тейлора на ділянки ОА кільцевого зазору ДЗОР у вираз (39) замість $\eta_{еф.}$ слід підставляти коефіцієнт динамічної в'язкості води η, а для ділянки АС – вираз (7). Тому для ділянки АС отримаємо таку залежність

$$u'_{\Theta} == 1{,}165 \cdot S(\zeta) \cdot D_p^2 \cdot \omega_p^2 \sqrt{\left(1 - \frac{K^2 \cdot T_{кр.}^2 \cdot 2^{2-n}}{\rho^2 \cdot D_p^{6-2n} \cdot \omega_p^{4-2n} \cdot \left(h_0^3 + h_0^4\right)} \right)}. \tag{40}$$

Для кількісної оцінки швидкості швидкості поширення збурень u'_{Θ} будемо використувати її безрозмірну величину отриману шляхом ділення на колову швидкість ротора

$$u'_{\Theta 0} = \frac{2 \cdot u'_{\Theta 0}}{D_p \cdot \omega_p} = 2{,}329 \cdot S(\zeta) \cdot D_p \cdot \omega_p \sqrt{\left(1 - \frac{K^2 \cdot T_{кр.}^2 \cdot 2^{2-n}}{\rho^2 \cdot D_p^{6-2n} \cdot \omega_p^{4-2n} \cdot \left(h_0^3 + h_0^4\right)}\right)}. \quad (41)$$

На основі формул (39) – (41) побудовані графічні залежності (**рис. 6**), які відображають зміну безрозмірної швидкості поширення збурень у кільцевому зазорі для параметрів ДЗОР, які відповідають діапазону виникнення виникнення вихорів Тейлора визначених за **рис. 5**.



а б

Рис. 6 – Залежність безрозмірної швидкості поширення збурень $u'_{\Theta 0}$ для ділянки ОА (а) та АС кільцевого каналу ДЗОР від діаметра ротора D_p та безрозмірної координати ζ : 1 – $\omega_p = 150$ рад/с, $h_0 = 0{,}1$; 2 – $\omega_p = 300$ рад/с $h_0 = 0{,}05$

Із отриманих графіків видно, що визначальний влив на швидкість поширення збурень $u'_{\Theta 0}$ має кутова швидкість обертання ротора ω_p та в'язкість рідини у якій відбувається їх поширення. Так для ділянки ОА кільцевого зазору ДЗОР, де відбувається рух 1-2 % розчину лугу (в'язкість рівна в'язкості води) даний параметр у двічі більший ніж для ділянки АС із сапропелем (псевдопластичною рідиною). Вплив кутової швидкості обертання ротора ω_p особливо значущим є за значення $\zeta = -0{,}4...0{,}5$ тобто у зоні примикання потоку до ротора. Такі значення вказують на доцільність подачі реагента 1 у зону змішування саме через отвори ротора, що забезпечить інтенсифікацію швидкості поширення збурень для в'язкопластичної рідини.

У той же час зростання діаметру ротора D_p та кутової швидкості обертання ротора ω_p спричинюватимуть зростання потужності необхідної для приводу ДЗОР, а збільшення безрозмірного h_0 забезпечуватиме зменшення градієта швидкості відносного зсуву шарів реагентів, що зменшуватиме інтенсивнсть їх перемішування.

ВИСНОВКИ

З метою активацію гумінових речовин органічного сапропелю найбільшого поширення набула технологія виготовлення ГОМД, в основі якої лежить властивість гумінових кислот (ГК) взаємодіяти із слабкими розчинами лугів, мінеральних кислот та їх солей з утворенням солей гумінових кислот – так званих, гуматів. Використання свіжо добутого сапропелю природної вологості, який не зазнав окислення киснем повітря забезпечу максимальне виділення ГК.

Основною технологічною складовою під час виділення (екстрагування) ГК є проведення якісної реакції, тобто досягнення умов за яких прореагує максимальна кількість органічної речовини з

екстрагентом. Для цього розроблена конструкція ДЗОР, який не вимагає попереднього змішування реагентів та забезпечує мікроперемішування сапропелю природної вологості ($W = 94 - 96$ %) із розчином лугу у кільцевому каналі між ротором та статором. Мікорперемішування реагентів відбувається під впливом комплексу складних гідродинамічних процесів, які спричинені дією відцентрової сили, зсувом шарів в осьовому та меридіальному напрямках через градієнт швидкості та наявністю двох шарів рідин із різним фізико-реологічним властивостями.

Дослідження впливу параметрів ДЗОР та властивостей реагентів на режими їх руху у кільцевому каналі показують, що для зони змішування виникнення турбулентного режиму руху є неможливим. На ділянці кільцевого каналу подачі реагента 2 можливий його турбулентний режим його руху за значень часу змішування $t_{зм}$, що не перевищує 0,5...0,7 с за діаметра ротора $D_p > 0,07$ м та зазору $h_0 = 0,12...0,15$. Тому інтенсифікація процесу перемішування реагентів можлива завдяки наданню ротору обертового руху, що забезпечує втрату стійкості потоку у радіальному напрямку виникнення вихорів Тейлора.

У зоні змішування тобто кільцевого каналу виникатимуть вихори Тейлора коли діаметр ротора буде більшим за 0,04 м, а його частота обертання більшою від 200...250 рад/с. При цьому безрозмірна величина зазору між ротором та статором не повинна бути меншою за 0,05. У зоні подачі реагента 2 кільцевого каналу за таких параметрів також будуть формуватись флуктуації параметрів потоку спричинені вихорами Тейлора.

Дослідження швидкості поширення збурень $u'_{\Theta 0}$ спричинених вихорами Тейлора виявило, що визначальний влив на неї має кутова швидкість обертання ротора ω_p та в'язкість рідини, яка знаходиться у каналі. Так для ділянки подачі реагенту 2 кільцевого каналу ДЗОР, де відбувається рух 1-2 % розчину лугу даний параметр у двічі більший ніж для ділянки змішування із сапропелем (псевдопластичною рідиною). Вплив кутової швидкості обертання ротора ω_p особливо значущим є за значення $\zeta = -0,4...0,5$ тобто у зоні примикання потоку до ротора. Такі значення вказують на доцільність подачі реагента 1 у зону змішування саме через отвори ротора, що забезпечить інтенсифікацію швидкості поширення збурень для в'язкопластичної рідини. У той же час зростання діаметру ротора D_p та кутової швидкості обертання ротора ω_p спричинюватимуть зростання потужності необхідної для приводу ДЗОР, а збільшення безрозмірного h_0 забезпечуватиме зменшення градієта швидкості відносного зсуву шарів реагентів, що зменшуватиме інтенсивнсть їх перемішування.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Шевчук, М.Й. (1996) *Сапропелі України: запаси якість та перспективи використання (Sapropel of Ukraine: reserves, quality and prospects for use)*. Луцьк, Надстир'я, 383 с.

Tsiz, I., Khomych, S., Didukh V. & Yukhymchuk, S. (2023) Study of dehydration of organic sapropel by compression method. *22nd International Scientific Conference Engineering for Rural Developmen*t. Jelgava, 173-178. https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF033/.

Zarina L., Cerina S., Proskina L. (2023) Effect of sapropel fertilizer on the quality of the yield of some field crops. *Agronomy Research*, 21(3), 1328-1337.

Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievinsh,G. (2014) Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth-affecting activity and cultivable microorganism content. *Zemdirbyste-Agriculture*, 101(4), 355–366. https://doi.org/10.13080/Z-A.2014.101.045.

Edesi L., Kangor T., Loide V., Vettik R., Tamm I., Kennedy H.J., Haljak M., Tamm U., Vosa T., Tamm K., Talve T., Karron E. (2020) Effects of lake sediment on soil chemical composition, dehydrogenase activity and grain yield and quality in organic oats and spring barley succession. *Agronomy Research*, 18(3), 2022-2032. https://doi.org/10.15159/AR.20.197.

Stankevica K., Burlakovs J., Klavins M. (2013) Organic rich freshwater sediments (sapropel) as potential soil amendment for recultivation of areas contaminated with heavy metals. *GeoConference on Water Re-sources, Forest, Marine and Ocean Ecosystems*, 595-601.

Stankevica K., Vincevica-Gaile Z., Klavins M. (2014) Influence of sapropel (gyttja) on trifolium pratense seeds germination in presence of copper. *GeoConference Proceedings on Soils, Forest Ecosystems, Marine and Ocean Ecosystems*, 2, 175-182.

Цизь І., Величко В. (2007) Дослідження впливу способу обробки на виділення гумінових кислот із сапропелю (Study of the influence of processing method on the extraction of humic acids from sapropel). *Visnyk of Lviv Agrarian University: Agronomy*, №4 11, 469-474.

Бортнік Т.П., Бортнік А.М., Сергушко О.Г. (2006) Вивчення доз внесення сапропелевого стимулятора росту за вирощування картоплі (Study of doses of sapropel growth stimulant application during potato cultivation). *Visnyk of the Dnipro State Agrarian and Economic University*, № 4(42), 12-15.

Schirmer C., Maschke R.W., Pörtner R., Eibl D. (2021) An overview of drive systems and sealing types in stirred bioreactors used in biotechnological processes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(6), 2225–2242. https://doi.org/10.1007/s00253-021-11180-7.

Ghanem A., Lemenand T., Della Valle D., Peerhossaini H. (2014) Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review. *Chemical engineering research and design*, vol. 92, Issue 2, 205–228.

Riera F.A., Alvarez R., Coca J. (1991) Humic fertilizers by oxidative ammoniation of hydrolyzed corncob residues. *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 30, no.4, 636-639.

Polyakovs A., Mironovs V., Korjakins A., Shishkin A., Baronins J. (2013) *Preparation of coal-water slurry using a high-speed mixer-disperser. 4th International Conference Civil Engineering*. Proceedings Part II Environment and Environmental Effects, 77-81.

Thakur R.K., Vial C., Nigam K.D.P., Nauman E.B., Djelveh G. (2003) Static mixers in the process industries – a review. *Transf. IChemE*, vol 81, part A, 787–826

Цизь, І.Є. Величко В.Л. (2008) *Патент України 30412 (Patent of Ukraine 30412)*. Київ: Державний департамент інтелектуальної власності.

Prandtl L. *Fundamentals Of Hydro And Aeromechanics*. (1934) Mcgraw Hill Book Company inc, 297 p.

Мандрус В.І., Лещій Н.П., Звягін В.М. *Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади розрахунку*. – Львів: Світ, 1995. – 264 с.

Хомич С.М., Цизь І.Є., Коробка М.І. (2013) Дослідження коефіцієнта динамічної в'язкості органічного сапропелю / *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. статей*. – Вип. 24. Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 404-412.

Nouri J.M., Whitelaw J.H. (1994). Flow of newtonian and nonnewtonian fluids in a concentric annuius with rotation of the inner cylinder. *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, 821-827.

Macosko C.W. (1994) *Rheology: principles, measurements, and applications*, Wiley-VCH, Inc., New York, 514 p.

Stuart J.T. (1986) Taylor-vortex flow: a dynamical. *Siam Review*. Vol. 28, Iss: 3, pp 315-342.

Taylor G.I. (1923), Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, Ser. A, 223, 289-343.

Wroński S., Jastrzębski M. (1990) Mass transfer in the spiral flow of a pseudoplastic liquid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, no. I, l-7.

Di Prima, R.C., Swinney, H.L. (1981). Instabilities and transition in flow between concentric rotating cylinders. In: Swinney, H.L., Gollub, J.P. (eds) *Hydrodynamic Instabilities and the Transition to Turbulence. Topics in Applied Physics*, vol 45. Springer, Berlin, Heidelberg, 139-180.

Stuart J.T. (1958) On the non-linear mechanics of hydrodynamic stability. *Journal of Fluid Mechanics*.; 4(1). Pp. 1-21.

Peng J., Zhu K.-Q. (2004) Linear stability of Bingham fluids in spiral Couette flow. *J. Fluid Mech.*, vol. 512, 21–45