

С.І. МОВЧАН, кандидат технічних наук
Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТЕЧІЇ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ В ЗАМКНеноМУ КОНТУРІ АПАРАТІВ НАПІРНОЇ ФЛОТАЦІЇ

З використанням математичного апарату розглянуто закономірності та обґрунтовано умови руху водного потоку у вертикальній площині в замкненому контурі апаратів напірної флотації, які визначають ефективність роботи водоочисного обладнання систем оборотного водопостачання промислових підприємств.

Ключові слова: водний потік, замкнений контур, апарати електрофлотокоагуляції, напірна флотація, дифузія, оборотне водопостачання, рух рідини.

С использованием математического аппарата рассмотрены закономерности и обоснованы условия движения водного потока в вертикальной плоскости замкнутого контура аппаратов напорной флотации, определяющие эффективность работы водоочистного оборудования систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: водный поток, замкнутый контур, аппараты электрофлотокоагуляции, напорная флотация, диффузия, обратное водоснабжение, движение жидкости.

Using the mathematical apparatus, the regularities of the motion of the water flow in the vertical plane of the closed contour of pressure flotation devices that determine the efficiency of the operation of water purification equipment of the circulating water supply systems of industrial enterprises are considered and the conditions if this motion are substantiated.

Key words: water flow, closed loop, electrophotocoagulation devices, pressure flotation, diffusion, circulating water supply, fluid motion.

Вступ. Вода, водні ресурси – це найважливіші компоненти водогосподарського комплексу країни, який в самому широкому розумінні відіграє важливу роль у всіх сферах людської діяльності.

При здійсненні водогосподарської політики в нашій країні впродовж багатьох десятиліть вода ніколи не розглядалася як основа життєзабезпечення природних екосистем і людини, не враховувався і не

прогнозувався екологічний стан водних систем та їхній вплив на біорізноманіття [1, 3].

Згідно Постанови Кабінету Міністрів України “Про затвердження критеріїв...” водоочисне обладнання повинно відповідати наступним головним критеріям: технічним і еколого – економічним [2, 2]. В тому числі, такий оцінці відповідають апарати напірної флотації систем оборотного водопостачання.

У технології систем оборотного водопостачання технологічне обладнання з потужністю 1...10 м³/год. займає відповідне місце внаслідок компактності, надійності та ефективності роботи в системах промислового водопостачання.

Постановка проблеми. Водний потік, який рухається в замкненому контурі апаратів напірної флотації, утворює складний процес. Крім сил, які діють у вертикальній та горизонтальній площинах, водний потік на своєму шляху пересилює опір сил у вертикальній площині.

Розташування сил, діючих на кожну окрему частинку в рідині, що рухається як у вертикальній так і горизонтальній площин ах, наведена на рис. 1 [3, 11].

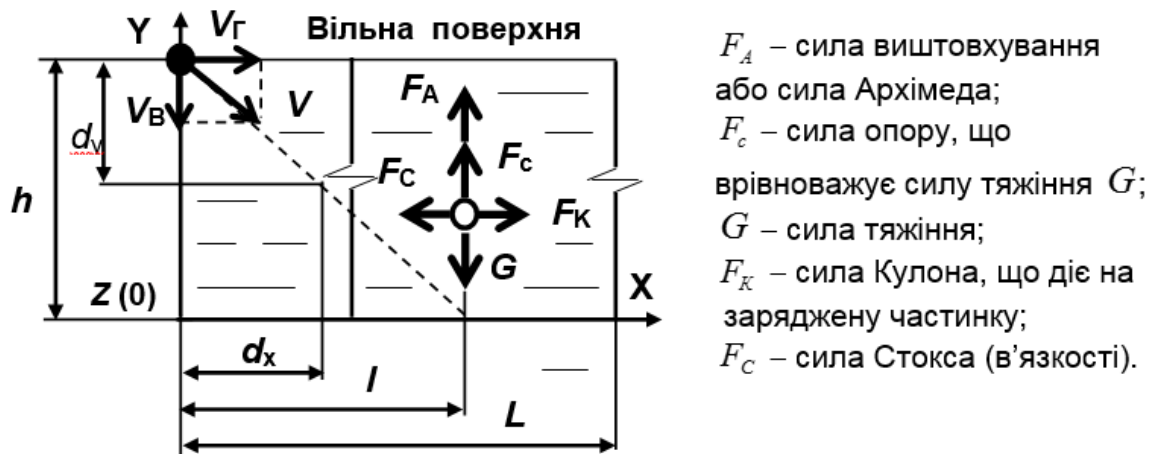


Рис. 1. Діаграма сил, діючих на частинку, що вільно осаджується і рухається в рідинному середовищі

Згідно з дослідженнями роботи апаратів напірної флотації отримано оптимальне співвідношення між їх діаметром та висотою, кількістю ступенів (камер) оброблення стічних вод тощо. Визначальним фактором дослідження водного потоку є наявність умов забезпечення ефективної роботи водоочисного обладнання.

Актуальність обраного напрямку досліджень. Згідно динаміки руху безперервного середовища, рух рідини вважається заданим у разі, коли в будь – який момент часу t можливо визначити (вирахувати із заданою точністю) поле швидкостей частинок середовища $V(x, t)$ в будь – якій точці x об’єму. Крім того, поля швидкостей визначаються іншими величинами, що

характеризують стан середовища: густина $\rho(x, t)$, тиск $P(x, t)$, температура $T(x, t)$ та інш. (рис.2) [4, 11].



Рис. 2. Блок – схема математичного опису руху суцільного рідинного середовища

Тому розроблення математичних моделей для систем складного руху висхідних і низхідних водних потоків є актуальним завданням в роботі напірних систем оброблення стічних вод.

Актуальність теми підтверджується тим, що багаторічний досвід у галузі промислового водопостачання ставить перед науковцями завдання пошуку більш ефективних та надійних шляхів підвищення якості оброблення стічних вод.

Правильний вибір моделі процесу часто забезпечує позитивне рішення поставлених задач. Теоретичними передумовами для створення математичної моделі послужили дослідження в галузі вивчення процесів та явищ, що відбуваються в процесах електрофорезу і седиментації [5, 4], інтенсифікації систем промислового водопостачання [6, 3], а також окремих елементів та складових одиниць, що входять до її складу [10, 8; 11, 7-8].

Аналіз конструктивних рішень, що відповідають напряму досліджень. Конструктивні виконання апаратів напірної флотації з круглим перерізом і вертикальним розташуванням набули широкого розповсюдження в системах багаторазового використання оброблених стічних вод промислових підприємств.

Апарат для оброблення стічних вод гальванічних відділень складається з корпусу апарату, вертикальних колекторних труб із засипним анодним матеріалом, камер реакції, вертикально розташованих у вигляді шестигранної труби. Нижня частина корпусу апарату має конусну форму, в якому рух через них здійснюється висхідними й низхідними потоками [5, 3].

Апарат оброблення стічних вод включає нижню конусну частина корпусу електрокоагулятора, яка складається з трьох секцій у вертикальній площині, діелектричної труби з анодом і катодом та вертикально розташованих перфорованих стаканів з анодом й катодом із електрохімічно розчинного засипного матеріалу [6, 3-4].

Підведення стічної води на оброблення в трисекційному електрокоагуляторі відбувається до вертикально розташованих перфорованих ємностей з анодом і катодом та колекторних труб із електрохімічно розчинного засипного матеріалу [7, 4].

В електрокоагуляторі камери реакції розташовані по колу між внутрішніми та зовнішніми коаксіальні ємності [8, 3-4].

Наведені конструктивні рішення відрізняє вертикальне розташування корпусу апарату, насиченість електродних систем в його середині, що розширює функціональні можливості водоочисного обладнання з одного боку, а з іншого – значна кількість гідравлічних опорів, що впливають на суцільність потоку в обох напрямках.

Шляхи вирішення конкретної задачі, пов'язаної із розробленням математичної моделі, коли має місце невстановлений рух нестисненої в'язкої рідини вирішуються наближеними методами [4, 111].

Метою досліджень є встановлення залежностей, які визначають параметри руху в'язкої рідини всередині апарату напірної флотації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити умови дії сил гідродинамічної течії в'язкої рідини у вертикальній поверхні замкнених контурів апаратів напірної флотації.
2. Встановити зв'язок між потужністю водоочисного обладнання і головними параметрами роботи водоочисного обладнання.

Математичне оформлення і гідродинамічні аспекти руху водного потоку у вертикальній площині

Основні рівняння і залежності, які використовуються для математичного моделювання процесів в системі водопостачання:

- рівняння нерозривності потоку:

$$Q = \omega \cdot v, \quad (1)$$

- рівняння траєкторії руху частинки:

$$\frac{\partial z}{v \pm u_w} = \frac{\partial z}{u + u_w \cdot \frac{\omega^2 \cdot r}{g}}, \quad (2)$$

де u_w – гідравлічна крупність, м/с;

Закон Фіка строго виконується лише для бінарних сумішей у разі відсутності всіх градієнтів, крім градієнтів концентрації [Кейс 9, с. 351].

Розроблені оптико-механічні системи визначення гідромеханічних параметрів частинок водних розчинів дозволяють визначати гідромеханічні параметри частинок водних розчинів [10, 9; 11, 11].

Розподіл іонів у дифузній частині подвійного електричного шару описується теорією Гуї–Чепмена, яка розглядає тільки електростатичну взаємодію й моделює іони зарядженими точками [12, 194].

У теорії електрофорезу, розробленої Смолуховським и Гюккелем, відповідно якої рух частинки в електричному полі розглядається як результат

дії на її поверхневий заряд сили Кулона з боку електричного поля і сили в'язкості у горизонтальній площині. А у вертикальній площині: силі тяжіння й в'язкості та силі Архімеда. Таке розташування сил та їх дія в горизонтальній та вертикальній площинах стало основою проведених досліджень [13, 42-44].

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_\kappa + \vec{F}_c = 0 \\ \vec{F}_m + \vec{F}_A + \vec{F}_c = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

з урахуванням вищезначених сил маємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_\kappa = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot r \cdot \xi \cdot E = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot V_\Gamma = F_c \quad (4.1) \\ \vec{F} = m \cdot \vec{g} = \rho \cdot V \cdot \vec{g} = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D^3}{8} \cdot \vec{g} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \rho \cdot \vec{g} \quad (4.2) \\ \vec{F}_A = -m_1 \cdot \vec{g} = -\rho_1 \cdot V \cdot \vec{g} = -\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3 \cdot \rho_1 \cdot \vec{g} \quad (4.3) \\ \vec{F}_c = -6 \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \eta \cdot \vec{V}_B \quad (4.4) \end{array} \right.$$

Дослідження руху частинок домішок водних розчинів висхідними і низхідними потоками дозволили встановити, що сила опору (рис. 3), яка обумовлена тертям сил в'язкості, відповідно закону Стокса, згідно формули (4.4) для сферичних частинок дорівнює:

$$F_{con} = 6\pi\alpha\eta v, \quad (5)$$

де F_{con} – сила опору руху частинки; η – коефіцієнт абсолютної в'язкості; α – радіус частинки; v – швидкість частинки відносно рідини.

Внаслідок того, що F_{con} залежить від швидкості частинки, зануреної в рідину, на котру діє ще й сила тяжіння $F_t = mg$ (m – маса частинки, g – прискорення вільного падіння) і сила Архімеда $F_a = m_1g$ (m_1 – маса рідини, витисненою), рухається на початку з прискоренням, поки швидкість V не досягне величини, при котрій сума сил, що діє на частинку, не стане дорівнювати нулю, тобто має місце:

$$mg = F_a + F_{con}, \quad (6)$$

Рівняння для надходження швидкості V_1 – рівномірного руху твердої частинки в рідині вдовж вертикальної осі, використовуючи рівність (6) і, виразивши масу частинки через густину ρ , радіус частинки через a та масу рідини, витиснену через густину ρ_1 , отримаємо:

$$\frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot a^3 = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \rho_1 \cdot g \cdot a^3 + 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a \cdot V_1, \quad (7)$$

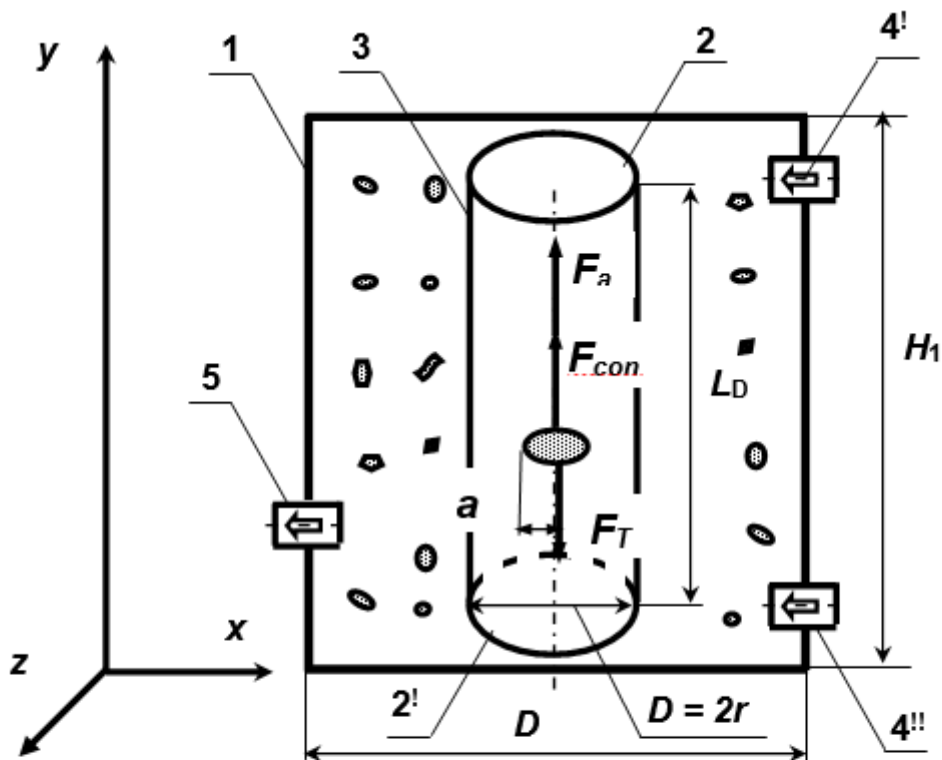


Рис. 3. Контрольний об'єм в середині вертикально розташованого апарату: 1 – корпус апарату; 2, 2' – горизонтальна, відповідно верхня та нижня грані вертикального циліндра; 3 – бокова поверхня циліндра; 4'...4'' – трубопроводи підведення стічних вод для оброблення; 5 – трубопровід відведення стічних вод після оброблення

Звідси швидкість V_1 рівномірного руху частинки домішок водних розчинів в рідині вздовж вертикальної осі визначається за формулою:

$$V_1 = \frac{2 \cdot (\rho - \rho_1) \cdot g \cdot a^2}{9 \cdot \eta} \quad (8)$$

Наведена формула (8) справедлива для умов встановленого руху частинок достатньо великих розмірів, які знаходяться в умовах малої концентрації.

Час осадження частинки на поверхні даного радіуса можливо знайти, оцінивши попередньо час розгону частинки при її зануренні в рідині на глибину h (рис. 3)

Рівняння руху частинки в рідині при $g \neq 0$ має вигляд:

$$mz'' = m_1g - mg - 6\pi\alpha\eta z' \quad (9)$$

де z' и z'' – перша і друга похідні $z(t)$ по часу.

Поділивши (9) на m і виразивши маси частинки і рідини через їх густину (частинки і рідини), отримуємо рівняння для $z(t)$ з початковими умовами:

$$z'' + az = -\beta, \quad z(0) = H, \quad z(t) = 0, \quad (10)$$

в якому введені позначення:

$$\alpha = \frac{9 \cdot \eta}{2 \cdot a^2 \cdot \rho},$$

$$\beta = \frac{g \cdot (\rho - \rho_1)}{\rho},$$
(11)

Виконавши заміну $z' = V$, $z'' = V'$, отримаємо диференційне рівняння для знаходження $V(t)$:

$$V' + \alpha V = -\beta, \quad V(0) = 0, \quad (12)$$

Рішення цього рівняння має наступний вигляд:

$$V(t) = -V_1(1 - e^{-\alpha t}), \quad (13)$$

Інтегрування рівняння (13) отримаємо з урахуванням початкових умов залежність координати z частинки від часу:

$$z_{(t)} = H - V_1 \left[t - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \right], \quad (14)$$

Час розгону t , швидкість V_1 , і шлях h , що пройшла частинка для досягнення цієї швидкості можливо визначити, виходячи із кінетичного аналізу. Можливо вважати, що час розгону t , це час, за який пройшла частинка для досягнення швидкості, яка відрізняється від V_1 на 1% тобто:

$$\frac{V_1 - V}{V_1} = e^{-\alpha t} = 0.01, \quad (15)$$

тоді,

$$\tau = \frac{2 \ln 10}{\alpha} = \frac{4.6}{\alpha} \cong \frac{\rho}{\eta} \alpha^2, \quad (16)$$

Шлях h , що пройшла частинка за цей же час, отримаємо із (14) з урахуванням (15) та (16):

$$h = H - z_{(t)} = V_1 \left[\tau - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \tau}) \right], \quad (17)$$

Отримані результати досліджень [14, 134] доводять, що час руху до швидкості V_1 для більших за розмірами частинок $d > 50 \cdot 10^{-6}$ м, який відбувається у більш в'язких рідинах (розчинах масел і нафтопродуктах) 0,03-0,05 с. Шлях, що пройшла частинка, дуже незначний. Тому при визначенні часу осадження із значною товщею шару водного розчину H (рис. 3) можливо використовувати лише величиною швидкості V_1 із рівняння (8). Внаслідок чого час осаджування визначається за формулою:

$$t_0 = \frac{H}{V_1}, \quad (18)$$

Таким чином, обираючи габаритні розміри апаратів напірної флотації (висоту H , діаметр D), умовами його роботи і розмірами частинок водних розчинів (ефективний діаметр $D_{\text{еф}}$), які необхідно видалити із стічних вод та кількість ступенів оброблення стічних вод (коаксіальних ємностей n), можливо визначити потужність водоочисного обладнання. [11, 1-8].

Остання обставина є необхідною умовою при проектуванні та експлуатації водоочисного обладнання в системах оборотного водопостачання [15, 1-10].

Задавшись величиною H – висотою апарату, вимогами до очищених стічних вод (мінімальним ефективним діаметром частинок домішок водних розчинів $D_{\text{еф}}$) та іншими конструктивними параметрами устаткування можливо визначити його потужність за одиницю часу.

Висновки та перспективи подальших розробок

Враховуючи умови руху водного потоку у вертикальній площині, сили, що діють на частинку, доведено, що цей рух є досить складним і визначальним в роботі апаратів напірної флоатації.

1. Між потужністю роботи водоочисного обладнання, розмірами частинок домішок водних розчинів існує залежність, яка дозволяє керувати процесами оброблення стічних вод промислових підприємств.

2. Встановлено, що для забезпечення ефективності роботи водоочисного обладнання необхідно мати на увазі швидкість руху водного потоку i , як наслідок, частинки домішок, яка залежить від густини розчину, концентрації забруднень, збільшення площини живого перерізу та об'єму апарату тощо.

Список літератури:

1. *Яцик А.В.* Водні ресурси: використання, охорона, відтворення, управління: Підручник для студентів вищих навч. закладів / А.В. Яцик, Ю.М. Грищенко, Л.А. Волкова, І.А. Пашенюк. К.: Генеза, 2007. 360 с.

2. *Постанова* Кабінету Міністрів України “Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері питного водопостачання і водовідведення та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю)” від 14 січня 2009 р. N 16 // Офіційний вісник України. 2009. N 4. Ст. 100.

3. *Куликов Н.И.* Теоретические основы очистки вод: учебное пособие / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернышев. Донецк: Ноулидж, 2009. 298 с.

4. *Лаврентьев М.А.* Проблемы Гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат Изд. 2-е. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М., 1977. 408 с.

5. *Патент* на корисну модель № 103688 Україна, МПК⁷ (2015.01) C02 F103/16(2006.01). C02 F1/00. Апарат оброблення стічних вод гальванічних відділень [текст]: / С.І. Мовчан. Заявка № а 201506137; заявл. 22.06.2015, опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.

6. *Патент* на корисну модель № 109872. Україна, МПК⁷ (2006.01) C 02 F1/46. Апарат для оброблення стічних вод [текст]: / С.І. Мовчан. Заявка № у 2016 02900; заявл. 22. 03.2016, опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.

7. *Патент* на корисну модель № 111868 Україна, МПК⁷ (2006.01) C02 F1/46. Трисекційний електрокоагулятор [текст]: / С.М. Епоян, С.І. Мовчан. Заявка № у 2016 04936; заявл. 04.05.2016. Опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.

8. *Патент* на корисну модель № 112945 Україна, МПК⁷ (2006.01) C02 F1/46. Електрокоагулятор [текст]: / С.І. Мовчан. Заявка № u 2016 05337; заявл. 17.05.2016. Опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

9. *Кэйс В.М.* Конвективный тепло- и массообмен. Пер. с англ. / В.М. Кэйс М.: Энергия. 1972. 448 с.

10. *Авторські права* на твір. Свідоцтво № 58251 Оптичні способи визначення гідромеханічних параметрів частинок водних розчинів [текст]: /М.В. Морозов, С.І. Мовчан. Заявка № 58710. Від 25.11.2014 р. Дата реєстрації 23.01.2015 р.

11. *Авторські права* на твір. Свідоцтво № 67544 Оптико-механічні системи визначення гідромеханічних параметрів частинок водних розчинів [текст]: / С.І. Мовчан. Заявка № 68162. Від 04.07.2014 р. Дата реєстрації 02.09.2016 р.

12. *Запольський А.К.* Водопостачання, водовідведення та якість води: Підручник / А.К. Запольський. К.: Вища шк., 2005. 671 с.

13. *Мовчан С. И.* Усовершенствование методов обработки и контроля качества сточных гальванических производств (применительно к предприятиям по ремонту сельскохозяйственной техники): дис ... канд. техн. наук / С.И. Мовчан. Мелитополь, 2003. 137 с.

14. *Сизова Н.Д.* Использование моделирования в процессе очистки сточных вод для интенсификации работы оборотных систем водоснабжения / Н.Д. Сизова, С.М. Епоян, С.І. Мовчан // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА ХОТВ АБУ, 2014. Вип. 2 (76). С. 132-136.

15. *Авторські права* на твір. Свідоцтво № 70439. Комп'ютерне моделювання й вимірювання параметрів частинок домішок в прозорих рідинах за допомогою багатofункціональних оптичних систем [текст]: / М.В. Морозов, С.І. Мовчан / Заявка № 71112. Від 19.12.2016 р. Дата реєстрації 14.02.2017 р.

Стаття надійшла до редакції 12.11.17