



## ODDÍL 10. TECHNICKÉ VĚDY

*§10.1 ГІДРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТРУБЧАСТИХ ФЛОКУЛЯТОРІВ У СИСТЕМАХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД (Дейко Н.Р., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Шестопапов О.В., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Босюк А.С., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Гайдучок О.Г., Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Авдєєва О.П., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)*

**Вступ.** Сучасний розвиток промисловості, урбанізація та зростання об'ємів водоспоживання супроводжуються значним збільшенням кількості стічних вод, які містять завислі, колоїдні та органічні забруднення [1–4]. Одним із найбільш ефективних методів підготовки та очищення води є застосування процесів коагуляції та флокуляції, які забезпечують укрупнення дрібнодисперсних частинок та їх подальше видалення [5, 6]. Ефективність цих процесів значною мірою визначається гідродинамічними умовами перемішування, характером турбулентності та конструктивними особливостями флокуляторів [7, 8].

Останніми роками особливого поширення набули трубчасті флокулятори, які характеризуються компактністю, простотою конструкції, низькими енерговитратами та можливістю ефективного регулювання процесів перемішування [9]. Разом із тим недостатньо дослідженими залишаються питання впливу конструктивних параметрів на структуру потоку, локальну



турбулізацію, процеси утворення та руйнування флокул. Особливу роль відіграють повороти трубопроводів, у яких виникають локальні вихори, вторинні течії та підвищені зсувні напруження [10].

**Виклад основного матеріалу.** Забруднення природних водойм недостатньо очищеними стічними водами є однією з найбільш актуальних екологічних проблем [1, 2]. Тонкодисперсні та колоїдні забруднення характеризуються високою агрегативною стійкістю і практично не видаляються традиційними механічними методами [5].

Процеси коагуляції та флокуляції є основними стадіями фізико-хімічного очищення води. Коагуляція забезпечує дестабілізацію колоїдних частинок, а флокуляція – укрупнення мікроагрегатів у більші флокули [3, 4, 6, 7]. Ефективність цих процесів суттєво залежить від гідродинамічних умов перемішування [8]. Схематичне зображення механізму цих процесів наведено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Механізм процесів коагуляції та флокуляції



## MODERNÍ ASPEKTY VĚDY

*Svazek LXIX mezinárodní kolektivní monografie*

Колоїдні системи характеризуються високою агрегативною стійкістю через наявність електричного заряду на поверхні частинок [10]. Основне завдання коагуляції – нейтралізація цього заряду за допомогою коагулянтів [1, 11], що призводить до дестабілізації колоїдних частинок і формування мікрофлокул. Подальше зростання їх розмірів забезпечується процесом флокуляції завдяки міжчастинковим зіткненням та дії полімерних флокулянтів [12, 13].

Для оцінки гідродинамічних умов флокуляції широко використовується градієнт швидкості  $G$ , який характеризує інтенсивність зсувної дії потоку і пов'язаний зі швидкістю дисипації кінетичної енергії турбулентності у потоці. Концепція градієнта швидкості була запропонована Т. Кемпом [14]. У зв'язку з цим був введений критерій Кемпа  $Gt$ , який враховує одночасно градієнт швидкості та час перебування рідини у флокуляторі. Оптимальні значення  $Gt$  залежать від типу забруднень, властивостей реагентів та конструкції флокулятора [15].

З точки зору механізму взаємодії частинок розрізняють перикінетичну та ортокінетичну флокуляцію [16]. Перикінетична флокуляція обумовлена броунівським рухом частинок і є характерною для високодисперсних систем. В умовах очищення природних та стічних вод основну роль відіграє ортокінетична флокуляція, що виникає під дією градієнтів швидкості та турбулентних пульсацій потоку. Зі збільшенням інтенсивності перемішування зростає частота зіткнень між частинками, однак надмірні зсувні напруження можуть призводити до руйнування вже сформованих флокул [8]. Таким чином існує оптимальний діапазон гідродинамічних параметрів, за якого забезпечується максимальна швидкість росту агрегатів.

Руйнування флокул відбувається внаслідок перевищення локальними гідродинамічними силами міжчастинкових сил зчеплення. Найбільш



інтенсивно цей процес проявляється в зонах локального прискорення потоку, поблизу стінок труб та у колінах трубопроводів. При цьому можуть спостерігатися як повне руйнування агрегатів, так і їх часткове фрагментування з подальшою рекоагуляцією [8, 13, 14].

В сучасних системах застосовуються наступні типи флокуляторів: механічні, гідравлічні, камерні, перегородчасті, вихрові та трубчасті [17]. Трубчасті флокулятори вирізняються простотою конструкції та низькими енерговитратами [9, 18].

Ефективність процесу флокуляції залежить від багатьох факторів: типу та дозування коагулянту та флокулянту, гідродинамічного режиму, часу контакту, температури та рН середовища. Правильний вибір типу флокулятора дозволяє оптимізувати технологічну схему очистки води, знизити експлуатаційні витрати та підвищити якість очищеної води. У сучасній практиці спостерігається тенденція до використання комбінованих та модульних систем, які поєднують переваги різних типів флокуляторів залежно від конкретних умов водопідготовки чи водовідведення.

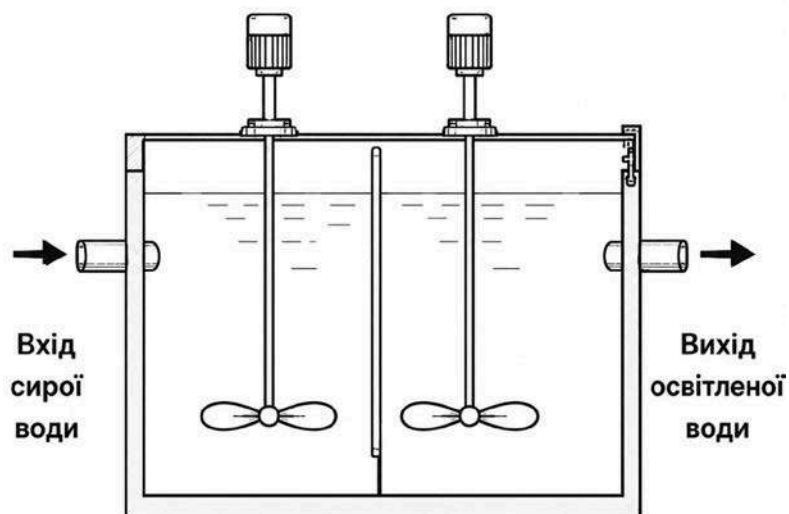
Приведена класифікація (рис. 1.2) свідчить про значну різноманітність конструктивних рішень, які відрізняються способом перемішування, гідродинамічними характеристиками та умовами формування пластівців. Серед численних типів особливий інтерес становлять трубчасті флокулятори, в яких процес укрупнення частинок відбувається безпосередньо під час руху води системою труб або каналів спеціальної конфігурації. Завдяки простоті конструкції, відсутності рухомих елементів та можливості ефективного використання енергії потоку такі споруди набули широкого застосування в системах водопідготовки різної продуктивності.



Рисунок 1.2 – Класифікація коагуляторів та флокуляторів

На рисунках 1.3–1.10 наведені приклади найбільш поширених конструкцій коагуляторів та флокуляторів.

Камерний коагулятор (рис. 1.3) призначений для швидкого змішування коагулянту з водою. Перемішування здійснюється механічними мішалками, що забезпечують рівномірний розподіл реагенту по всьому об'єму. У процесі роботи відбувається дестабілізація колоїдних частинок і утворення первинних мікрофлукул. Такі коагулятори характеризуються високою інтенсивністю перемішування та використовуються як початковий етап реагентного очищення води.



**Швидке змішування  
(коагуляція)**

Рисунок 1.3 – Камерний коагулятор

У механічному флокуляторі з горизонтальним валом (рис.1.4) перемішування здійснюється лопатями, закріпленими на валу, розташованому вздовж споруди. Вода послідовно проходить через кілька зон зі зниженою інтенсивністю перемішування. Це сприяє зіткненню та укрупненню мікрофлукул без їх руйнування. Конструкція забезпечує ефективне формування пластівців при відносно невеликих витратах енергії.

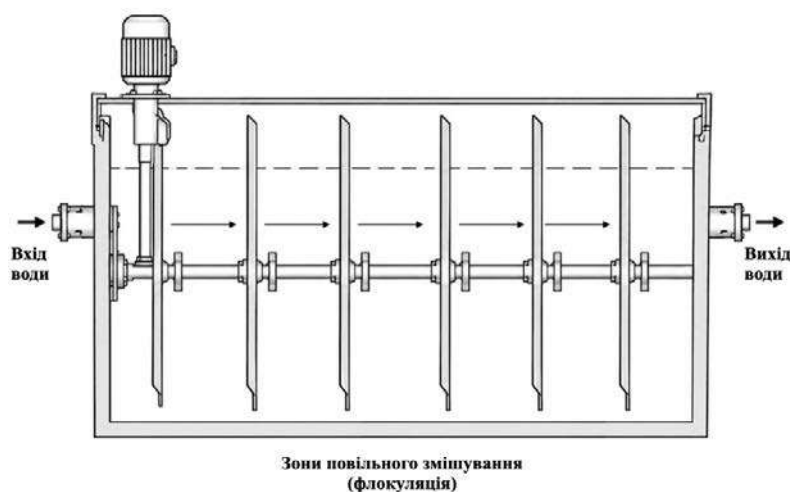


Рисунок 1.4 – Механічний флокулятор з горизонтальним валом

У механічному флокуляторі з вертикальним валом (рис. 1.5) перемішування здійснюється мішалками, встановленими на вертикальних валах. Камери флокулятора забезпечують поступове зниження швидкості руху води та інтенсивності перемішування. За таких умов відбувається ріст пластівців і підвищується їхня міцність. Вертикальні флокулятори часто застосовуються на станціях водопідготовки середньої та великої продуктивності.

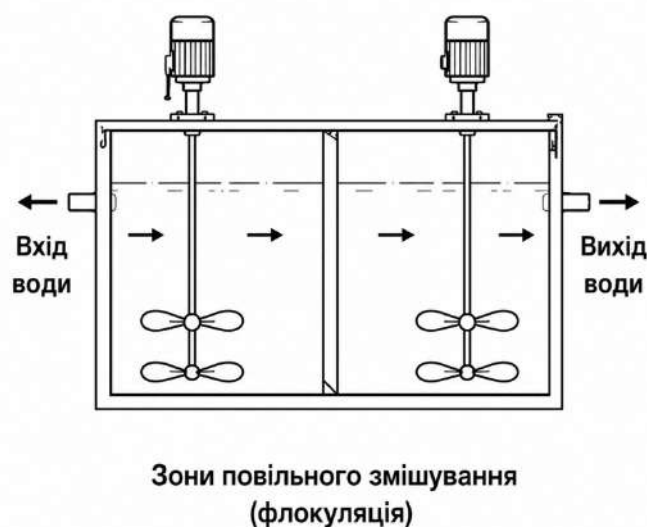
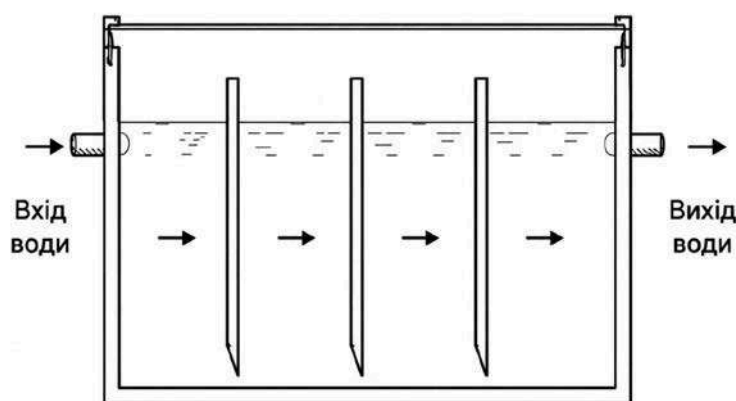


Рисунок 1.5 – Механічний флокулятор з вертикальним валом



Гідравлічний флокулятор (рис. 1.6) працює без механічних перемішувальних пристроїв. Перемішування забезпечується зміною напрямку руху потоку води між перегородками. Внаслідок виникнення локальних турбулентних зон створюються умови для контакту частинок та утворення пластівців. Перевагою такої конструкції є простота експлуатації та низькі енергетичні витрати.



Зони повільного змішування  
(флокуляція)

Рисунок 1.6 – Гідравлічний флокулятор з перегородками

У пневматичному флокуляторі (рис. 1.7) перемішування води здійснюється за рахунок подачі стисненого повітря. Бульбашки повітря створюють циркуляційні потоки, які забезпечують інтенсивний контакт між частинками. Такий спосіб дозволяє рівномірно розподіляти енергію перемішування по всьому об'єму споруди. Пневматичні флокулятори відзначаються простотою конструкції та можливістю регулювання режиму роботи.

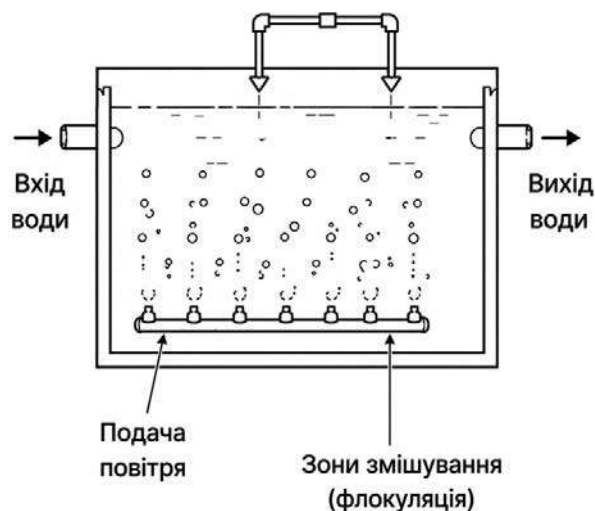


Рисунок 1.7 – Пневматичний флокулятор

Ламінарний флокулятор (рис. 1.8) складається з системи пластин або каналів, які спрямовують потік води по заданій траєкторії. Рух води відбувається переважно в ламінарному режимі, що зменшує ризик руйнування пластівців. Під час проходження через канали частинки поступово агрегуються та збільшуються в розмірах. Такі флокулятори характеризуються компактністю та високою ефективністю використання об'єму споруди.

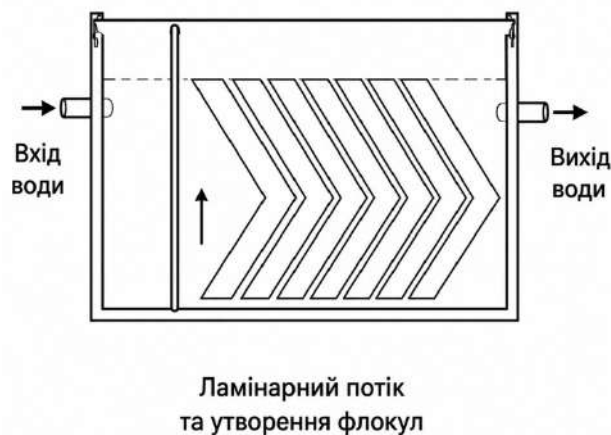


Рисунок 1.8 – Ламінарний (пластинчастий) флокулятор



У кільцевому флокуляторі (рис. 1.9) вода рухається від центру до периферії або в зворотному напрямку по радіальних каналах. Перемішування забезпечується механічними лопатями та особливостями гідродинаміки потоку. Радіальна схема сприяє рівномірному розподілу часу перебування води в апараті. Такі конструкції часто використовують на великих очисних спорудах завдяки їх високій продуктивності.

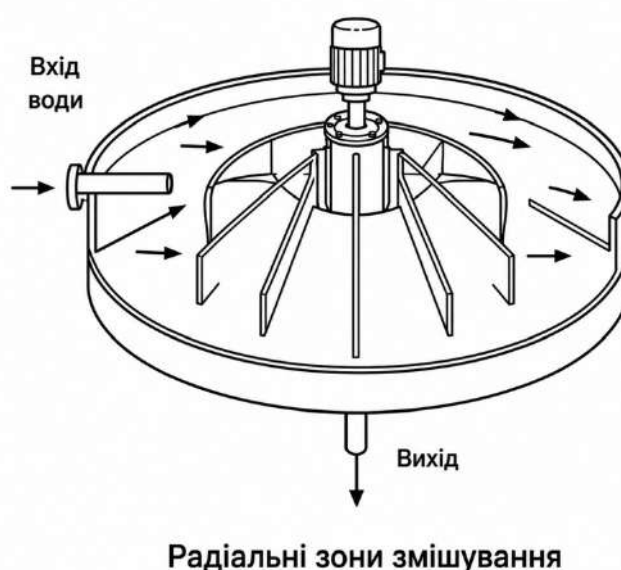


Рисунок 1.9 – Флокулятор в кільцевому (радіальному) виконанні

Флокулятор гібридного типу (рис. 1.10) поєднує процеси флокуляції та осадження в одній споруді. У першій зоні відбувається укрупнення пластівців, а в другій – їх осадження під дією сили тяжіння. Таке конструктивне рішення дозволяє скоротити площу очисних споруд та підвищити ефективність очищення. Гібридні системи особливо доцільні для модернізації існуючих водоочисних комплексів.

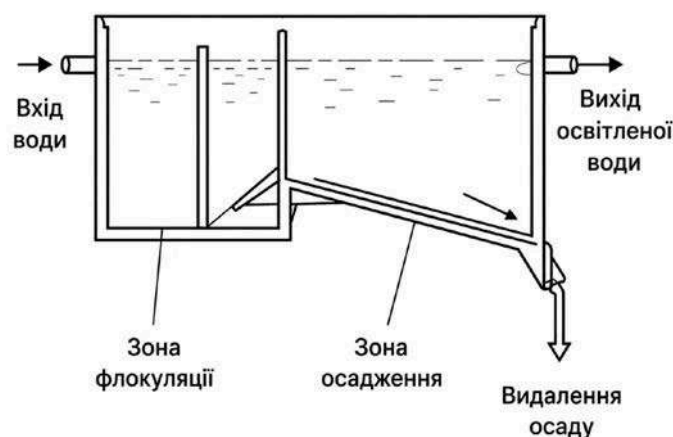


Рисунок 1.10 – Флокулятор з осадженням

Аналіз сучасних конструкцій [17, 19–21] показує, що вибір типу флокулятора залежить від продуктивності системи, властивостей забруднень, необхідної інтенсивності перемішування та енергетичних витрат. При цьому трубчасті флокулятори є перспективним напрямком розвитку систем водоочищення завдяки поєднанню простоти конструкції та можливості ефективного керування гідродинамічними процесами.

Важливу роль у роботі трубчастих флокуляторів відіграють повороти трубопроводів. У зоні повороту потоку виникають вторинні течії, відомі як вихори Діна, які формуються внаслідок дії відцентрових сил [22, 23]. Саме ці локальні гідродинамічні ефекти визначають структуру потоку та інтенсивність перемішування у реакторі.

Інтенсивність вторинних течій у криволінійних трубопроводах оцінюють за допомогою числа Діна [22]:

$$De = Re \sqrt{\frac{D}{2R_c}} \quad (1)$$

де  $Re$  – число Рейнольдса,  $D$  – внутрішній діаметр труби,  $R_c$  – радіус кривизни коліна.



Зі збільшенням числа Діна посилюється дія відцентрових сил, що призводить до інтенсифікації вторинних течій та розвитку вихорів Діна. Саме тому число Діна широко використовують для оцінювання інтенсивності поперечного перемішування в криволінійних трубах, змійовиках і трубчастих реакторах.

Основними конструктивними елементами трубчастого флокулятора є:

- трубчаста частина реактора;
- система колін та поворотних ділянок;
- вузол введення реагентів;
- змішувальні елементи;
- опорний каркас та система кріплення;
- патрубки подачі та відведення рідини.

Загальний вигляд типової конструкції трубчастого флокулятора представлено на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 – Типові конструкції флокулятора

Однією з головних переваг трубчастих флокуляторів є їх компактність та можливість інтеграції у технологічні схеми існуючих очисних споруд без значної реконструкції обладнання. Такі системи можуть ефективно працювати у широкому діапазоні витрат рідини та забезпечувати стабільний процес флокуляції навіть при змінному складі стічних вод [22].



## MODERNÍ ASPEKTY VĚDY

*Svazek LXIX mezinárodní kolektivní monografie*

Гідродинамічні процеси є одним із ключових факторів, що визначають ефективність роботи трубчастих флокуляторів. Саме структура потоку, рівень турбулентності, швидкість руху рідини та локальні зсувні напруження формують умови для зіткнення частинок, утворення флокул та їх подальшого росту або руйнування [8]. На відміну від традиційних камерних флокуляторів, у трубчастих системах перемішування забезпечується безпосередньо за рахунок енергії потоку, тому характер течії має вирішальний вплив на процес флокуляції.

Режим течії у флокуляторах визначається числом Рейнольдса, яке характеризує співвідношення інерційних та в'язкісних сил у потоці. Ефективність флокуляції значною мірою залежить від інтенсивності турбулентного перемішування: недостатня турбулентність зменшує частоту зіткнень між частинками та уповільнює утворення пластівців, тоді як надмірна турбулентність створює високі зсувні напруження, що можуть призводити до руйнування сформованих флокул. Тому для забезпечення ефективного процесу необхідно підтримувати оптимальний гідродинамічний режим, за якого досягається баланс між агрегацією та руйнуванням частинок.

Оскільки гідродинамічні процеси в трубчастих флокуляторах характеризуються складною просторовою структурою потоків, для їх дослідження та оптимізації варто використовувати CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics). Методи обчислювальної гідродинаміки дають змогу детально аналізувати: структуру потоку, розподіл швидкостей, турбулентність, кінетичну енергію, зсувні напруження і час перебування води в реакторі без необхідності проведення трудомістких натурних експериментів. Особливої це актуально для трубчастих флокуляторів зі складною геометрією, що містять повороти та змійовикові ділянки, де формуються вторинні течії та вихори Діна [22]. Результати чисельного



моделювання дозволять визначити зони інтенсивного перемішування, оцінити ризик руйнування флокул під дією локальних зсувних напружень, а також обґрунтувати оптимальні геометричні параметри флокулятора. CFD-моделювання слід використовувати для прогнозування ефективності роботи трубчастих флокуляторів та вдосконалення їх конструкції ще на етапі проєктування.

Математичною основою CFD-моделювання є система рівнянь Нав'є–Стокса, що описує закони збереження маси, імпульсу та енергії для в'язких рідин [24]. Розв'язання цих рівнянь дозволяє визначати просторово-часовий розподіл швидкостей, тиску та інших гідродинамічних параметрів потоку. Однак для більшості практичних задач водопідготовки, зокрема при дослідженні течії у трубчастих флокуляторах, режим руху рідини є турбулентним, що суттєво ускладнює пряме чисельне моделювання всіх масштабів турбулентних пульсацій. У зв'язку з цим при CFD-розрахунках широко застосовують осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є–Стокса (RANS), які доповнюються напівемпіричними моделями турбулентності. Найбільшого поширення набули моделі сімейства  $k$ – $\varepsilon$  та  $k$ – $\omega$ , а також модель зсувних напружень SST (Shear Stress Transport), яка поєднує переваги обох підходів і забезпечує підвищену точність прогнозування течій із відривом потоку, рециркуляційними зонами та складною просторовою структурою руху рідини [25]. Модель SST є переважною для трубчастих флокуляторів, оскільки вона точніше відтворює поведінку прилеглої шару в зонах відриву потоку та рециркуляції за колінами, де використання стандартної  $k$ – $\varepsilon$  моделі призводить до надмірного завищення турбулентної в'язкості. Саме тому моделі  $k$ – $\varepsilon$ ,  $k$ – $\omega$  та SST широко використовуються для дослідження гідродинаміки трубчастих флокуляторів, оцінювання рівня турбулентності, розподілу зсувних напружень і визначення умов утворення та руйнування флокул.



На рисунку 1.12 наведено алгоритм визначення параметрів течії у трубчастому флокуляторі за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки.



Рисунок 1.12 –Алгоритм визначення параметрів течії у трубчастому флокуляторі



Процес чисельного моделювання гідродинамічних процесів зазвичай включає декілька основних етапів:

- побудову геометричної моделі реактора;
- створення розрахункової сітки;
- задання граничних умов;
- вибір фізичної та турбулентної моделі;
- чисельне розв’язання системи рівнянь;
- аналіз отриманих результатів.

Однією з головних переваг методів обчислювальної гідродинаміки є можливість дослідження локальних гідродинамічних ефектів, які складно визначити експериментально. Зокрема, у трубчастих флокуляторах чисельне моделювання дозволяє аналізувати формування вторинних течій у колінах, розподіл швидкостей у поперечних перерізах, локальні зони турбулізації та потенційні області руйнування флокул [24].

Сучасні математичні моделі течії також можуть враховувати рух дисперсних частинок та процеси їх агрегації. Для цього використовуються моделі Euler–Lagrange або Euler–Euler, які дозволяють моделювати траєкторії частинок, зіткнення між ними та процеси утворення агрегатів [26]. Euler–Lagrange застосовується при  $\varphi < 10\%$  за об’ємом дисперсної фази, Euler–Euler – при більших концентраціях або великій кількості частинок. Це важливо для подальшого CFD-розрахунку. Такі підходи є особливо перспективними для дослідження процесів коагуляції та флокуляції.

**Висновки.** Трубчасті флокулятори є перспективним типом обладнання для систем очищення стічних вод завдяки компактності, низьким енерговитратам та можливості регулювання гідродинамічних умов. Ефективність процесу флокуляції в таких системах значною мірою залежить від правильного вибору діаметра труб, кількості та геометрії колін, а також підтримання



оптимальної швидкості потоку ( $Re: 2000–20\,000$  (перехідний і турбулентний режим);  $G: 10–100\text{ с}^{-1}$ ;  $Gt: 10^4–10^5$ ). Коліна трубопроводу відіграють ключову роль, створюючи зони локальної турбулізації, які забезпечують як інтенсифікацію перемішування, так і гідродинамічну селекцію флокул.

Подальше використання методів чисельного моделювання дозволить оптимізувати конструктивні параметри трубчастих флокуляторів та підвищити загальну ефективність процесів коагуляції та флокуляції в системах водоочищення.

#### Список використаних джерел:

1. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*. 2019. Vol. 17. P. 145–155.

2. Шестопапов О.В., Сакун А.О., Лізантан П.С., Кануннікова Н.О., Гайдучек О.Г., Томашевський Р.С., Воробйов Б.В. Аналіз показників якості води: сучасні аспекти і виклики. *Екологічні науки*. 2024. №3 (54). С. 76–82.

3. Кулініч С. С., Шкоп А. О., Босюк А. С., Шестопапов О. В., Лаврова І. О. Вплив концентрації та розміру твердої фази на ефективність флокуляції та седиментації тонкодисперсних завислих часток вугільних шламів. *Український журнал природничих наук*. 2026. №15. С. 270–279.

4. Kulinich S., Shkop A., Bosiuk A., Shestopalov O. Patterns of Aggregate Formation and Sedimentation of Fine Clay Particles. *Key Engineering Materials*. 2025. Vol. 1027. P. 93–100.

5. Bratby J. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. 3rd ed. London: IWA Publishing, 2016.



6. Gregory J., Barany S. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 169. No. 1. P. 1–12.

7. Wei J., Gao B., Yue Q., Wang Y., Li W., Zhu X. Comparison of coagulation behavior and floc structure characteristic of different polyferric-cationic polymer dual-coagulants in humic acid solution. *Water Research*. 2019. Vol. 154. P. 1–12.

8. Wang D., Wu R., Jiang Y., Chow C.W.K., Li X. Characterization and evaluation of floc strength and breakage in water treatment: A review. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 292. Article 112790.

9. Oliveira D.S., Sartori M., Donadel C.B. Spirally Coiled Tube Flocculators: A New Hydrodynamic Design for Water Treatment. *Modelling*. 2025. Vol. 6. No. 4. Article 139.

10. Rinaldi E., Canton J., Schlatter P. The vanishing of strong turbulent fronts in bent pipes. *Journal of Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 872. P. 367–406.

11. Derjaguin B., Landau L. Theory of the Stability of Strongly Charged Lyophobic Sols and of the Adhesion of Strongly Charged Particles in Solutions of Electrolytes. *Acta Physicochimica URSS*. 1941. Vol. 14. P. 633–662.

12. Letterman R. D. *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water*. 6th ed. New York : McGraw-Hill, 2012. 1920 p.

13. Gregory J. *Particles in Water: Properties and Processes*. Boca Raton : CRC Press, 2005. 432 p.

14. Camp T.R., Stein P.C. Velocity gradients and internal work in fluid motion. *J. Boston Soc. Civ. Eng.* 1943. Vol. 30. P. 219–237.

15. Romphopak P., Coufort-Saudejaud C., Le Men C., Painmanakul P., Liné A. Analysis of flocculation in a jet clarifier. Part 2 - Analysis of aggregate size distribution versus Camp number. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021. Vol. 175. P. 392–402.



16. Oyegbile B., Ay P., Narra S. Flocculation kinetics and hydrodynamic interactions in natural and engineered flow systems: A review. *Environmental Engineering Research*. 2016. Vol. 21. No. 1. P. 1–14.

17. García-Ávila F., Tenesaca-Pintado D., Novoa-Zamora F., Alfaro-Paredes E. A., Avilés-Añazco A., Guanuchi-Quito A., Tonon-Ordoñez M. D., Zhindón-Arévalo C. Vertical tubular flocculator: Alternative technology for the improvement of drinking water treatment processes in rural areas. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 331. Article 117342.

18. Garcia-Avila F., Cadme-Tandazo J., Aviles-Anazco A., Valdiviezo-Gonzales L., Cabello-Torres R., Cadme-Galabay M. Experimental approach and analysis of the effectiveness of a tubular helical flow flocculator for water supply in developing communities. *Heliyon*. 2024. Vol.10(12). Article e33101.

19. Pennock W. H., Lion L. W., Weber-Shirk, M. L. Design Algorithm for Vertically-Baffled Flocculators. *Environmental Engineering Science*. 2021. Vol. 38(7). P. 592–606.

20. García-Ávila F., Méndez-Heredia A., Trelles-Agurto A., Sánchez-Cordero E., Alfaro-Paredes E. A., Criollo-Illescas F., Tonon-Ordoñez M. D., Heredia-Cabrera G. Experimental Evaluation of Tubular Flocculator Implemented in the Field for Drinking Water Supply: Application in the Developing World. *Water*. 2023. Vol. 15(5). P. 833.

21. Oliveira D. S., Donadel, C. B. Helically Coiled Tube Flocculators in Water Clarification Systems: Optimal Length Evaluation and Process Efficiency Probabilistic Analysis. *Sustainability*. 2024. Vol. 16(5). P. 2172.

22. Saffar Y., Kashanj S., Nobes D.S., Sabbagh R. The Physics and Manipulation of Dean Vortices in Single- and Two-Phase Flow in Curved Microchannels: A Review. *Micromachines*. 2023. Vol. 14(12). P. 2202.

23. Qamareen A. et al. Modulation of Secondary Flows in Curved Serpentine Micromixers. *Chemical Engineering Communications*. 2022. Vol. 209(5). P. 648–667.



24. Versteeg H.K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2nd ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007. 503 p. ISBN 978-0131274983.

25. Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. 1994. Vol. 32(8). P. 1598–1605.

26. Crowe C., Schwarzkopf J., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2011. 509 p.