

О.А. СИРОВАТСЬКИЙ, кандидат технічних наук
О.Г. ГАЙДУЧОК, аспірант
Харківський національний університет будівництва та архітектури

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПІРНО-ФЛОТАЦІЙНОГО
ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ МАЛОКАЛАМУТНИХ КОЛЬОРОВИХ ВОД
ПОВЕРХНЕВИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ГОСПОДАРСЬКО-ПИТНОГО
ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Представлені результати теоретичних досліджень процесу напірної флотації при очищенні малокаламутних кольорових вод поверхневого джерела для господарсько-питного водопостачання.

Ключові слова: математична модель, напірна флотація, концентрація завислих часток, бульбашки повітря, господарсько-питне водопостачання.

Представлены результаты теоретических исследований процесса напорной флотации при очистке маломутных цветных вод поверхностного источника для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Ключевые слова: математическая модель, напорная флотація, концентрація взвешенных частиц, пузырьки воздуха, хозяйственно-питьевое водоснабжение.

The results of theoretical studies of the process of dissolved air flotation during clarification of low turbidity colored water of a surface source for drinking water supply are presented.

Keywords: mathematical model, dissolved air flotation, concentration of suspended particles, air bubble, drinking water supply.

Введення. Актуальність використання напірно-флотаційних методів очищення малокаламутних кольорових вод на станціях водопідготовки полягає в тому, що на теперішній час в Україні практично всі водні об'єкти зарегульовані [1,102]. Внаслідок цього, каламутність вихідної води не перевищує 50 мг/л, а невеликі значення швидкості руху води та дія сонячних променів зумовлюють утворення органічних сполук, що впливають на кольоровість води. У багатьох випадках значення кольоровості не перевищує 120 градусів за платиново-кобальтовою шкалою [2,228].

Водоочисні станції, які працюють за існуючими схемами очистки [3,75] (освітлення води у відстійниках або освітлювачах із шаром завислого осаду і фільтрування через зернисті фільтри) не можуть в осінній та весняний періоди якісно очистити воду, до вимог Державних санітарних норм та правил

"Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" [4,37]. Для дотримання норм потрібно при очищенні застосовувати підвищену дозу реагенту – коагулянту або значно збільшити загальний обсяг очисних споруд, що економічно недоцільно.

Сьогодні існує ряд методів і конструкцій очисних установок, що дозволяють підвищити ефективність обробки води. До них відносяться коагуляція мінеральними електролітами, флокуляція синтетичними реагентами, ультра- і мікрофільтрація [5,21;6,150; 7,24]. Однак, в сучасних умовах ці методи вимагають високих енерго- й експлуатаційних витрат і часто не забезпечують зростаючих вимог до якості очищеної води.

Ми вважаємо, що флотаційний метод є ефективним методом очищення малокаламутних кольорових вод, бо сутність процесу полягає в специфічній дії молекулярних сил між бульбашкою газу (повітря) та часткою забруднення. При зближенні у воді бульбашки і з гідрофобною поверхнею частки, тонкий шар, який їх розділяє, стає нестійким і розривається. Внаслідок цього, короткочасний їх контакт може призвести до злиття бульбашки і частки, а під дією підйомної сили агрегат, що утворився, буде прямувати на поверхню.

Крупність забруднюючих часток, які обумовлюють каламутність та кольоровість, знаходиться в межах $10^{-6} \dots 10^{-3}$ м. Для ефективного видалення таких часток необхідно щоб розміри бульбашок газу (повітря) знаходилися в межах $10^{-5} \dots 10^{-2}$ м. Отримати такі розміри можна тільки напірною або електро- флотаціями. Недоліками електрофлотації є специфічна технологічна схема та великі енергетичні витрати. Саме тому, на нашу думку, для ефективного очищення на водоочисних станціях краще застосовувати напірно-флотаційний метод.

Проведений літературний аналіз показав перспективність напірної флотації при очищенні вод поверхневих джерел для господарсько-питного водопостачання.

Впровадження на станціях водопідготовки в Швеції, Фінляндії і Великій Британії почалось ще на початку 60-х років. Дана технологія показала ефективність процесу при очищенні поверхневої води з малою каламутністю, наявністю в ній водоростей і природними пігментами. З того часу в цих країнах, а також в Норвегії, кількість таких установок збільшилось [8,45, 9,10].

В США та Канаді для очищення поверхневих вод, які мають низьку лужність, кольоровість та наявність водоростей, впровадження почалось на початку 80-х років. Наразі в цих країнах налічується близько 150 станцій обладнаних спорудами напірної флотації [10,1425;11,1173].

На рис.1 представлена технологічна схема процесу очищення поверхневої води за допомогою напірно-флотаційного методу [12,1].

Важливою перевагою напірно-флотаційного методу є ефективне очищення води від діатомових і зелених водоростей, флагелатів і ціанобактерій, які засмічують фільтри. За результатами дослідів, вчені

встановили, що ефективність очищення води від водоростей *Chlorellavulgaris* та *Cyclotellasp.* склала 90...99,9%. В цілому вважається, що напірна флотація здатна забезпечити ефективність очищення води 90...99% від різних видів водоростей. За аналогічних умов ефективність осадження складає 60...90% [11,1174; 13,1828].

Метою роботи є визначення залежності ефекту видалення часток забруднення з вихідної води від конструктивних параметрів флотаційної установки.

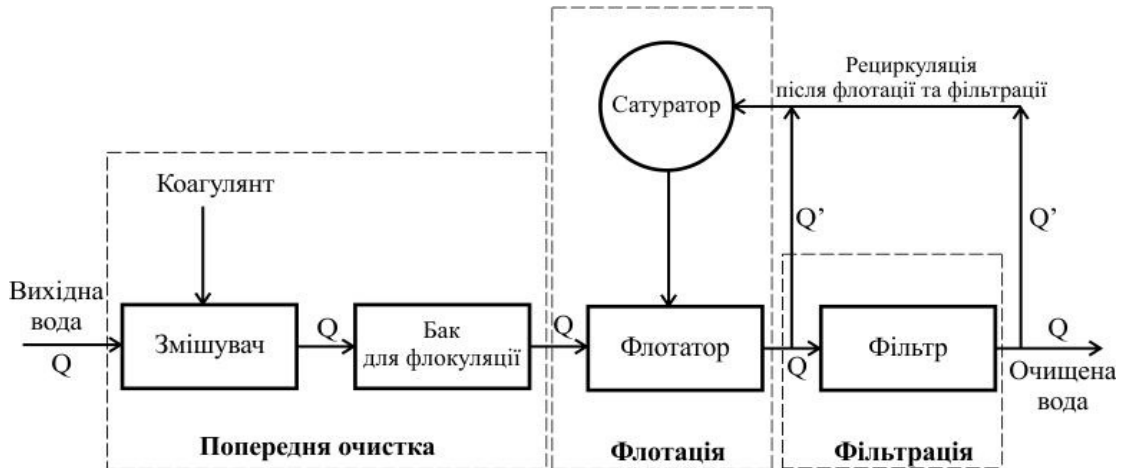


Рис.1. Технологічна схема процесу очищення поверхневої води за допомогою напірно-флотаційного методу

Основний розділ

Математична модель напірно-флотаційного процесу виглядає наступним чином:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + W \frac{\partial c}{\partial z} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - J, \quad (1)$$

де c – концентрація завислих часток у воді, мг/л; J – потік повітряних бульбашок у воді, c^{-1} , який складає:

$$J = - \left(\frac{\partial s}{\partial t} + (V_{\text{вод}} + V_{\text{бульб}}) \times \frac{\partial s}{\partial z} \right) = -A \cdot (S - C), \quad (2)$$

де S – кількість завислих часток на бульбашках; $V_{\text{вод}}$ – швидкість висхідного потоку; $V_{\text{бульб}}$ – швидкість підйому повітряної бульбашки; A – коефіцієнт.

Підставивши рівняння (2) в рівняння (1), отримаємо:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + W \frac{\partial c}{\partial z} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - A \cdot (S - C). \quad (3)$$

Швидкість висхідного потоку ($V_{\text{вод}}$) було прийнято на основі експериментальних досліджень і складає 1,3 мм/с.

Швидкість підйому повітряної бульбашки ($V_{\text{бульб}}$) у воді знайдемо за залежністю [14,156]:

$$V_{\text{бульб}} = \frac{(\rho_{\text{вод}} - \rho_{\text{пов}}) g d_{\text{екв}}}{18 \mu_{\text{вод}}} \times \frac{3(1 + \mu')}{2 + 3\mu'}$$

де $\rho_{\text{вод}}$ – густина води; $\rho_{\text{пов}}$ – густина повітря; g – прискорення вільного падіння; $d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр бульбашки; $\mu_{\text{вод}}$ – динамічна

в'язкість вод; μ' – параметр, який характеризує рухливість поверхонь розділу фаз, визначається [15,16]:

$$\mu' = \frac{\mu_{\text{повітря}}}{\mu_{\text{вод}}} \quad (4)$$

Таким чином, швидкість підйому у воді повітряної бульбашки діаметром $d = 15 \dots 30$ мкм складає $0,18 \dots 0,73$ мм/с.

Для вирішення цієї математичної моделі був застосований метод кінцево-різницевого рівнянь. Диференціальне рівняння було замінено на рівняння з різницевиими співвідношеннями:

$$\frac{C[i,j] - C[i,j-1]}{\Delta t} + W \frac{C[i,j] - C[i-1,j]}{\Delta z} = D \frac{C[i+1,j] - 2C[i,j] + C[i,j+1]}{\Delta z^2} - A \cdot (S[i,k-1] - C[i,k-1]);$$

$$\Delta t = \frac{T}{n-1};$$

$$\Delta z = \frac{H}{m-1};$$

де T – час; H – висота контактної зони (флотаційної камери).

Висота флотаційної камери прийнята 2 м.

Застосувавши комп'ютерний програмний комплекс *BorlandDelphi7* і підставивши відомі значення, ми визначили коефіцієнт A , який дорівнює 0,051.

Рішенням математичної моделі напірно-флотаційного процесу очищення малокаламутних вод є значення концентрацій завислих часток у воді по висоті флотаційної камери (рис.2).

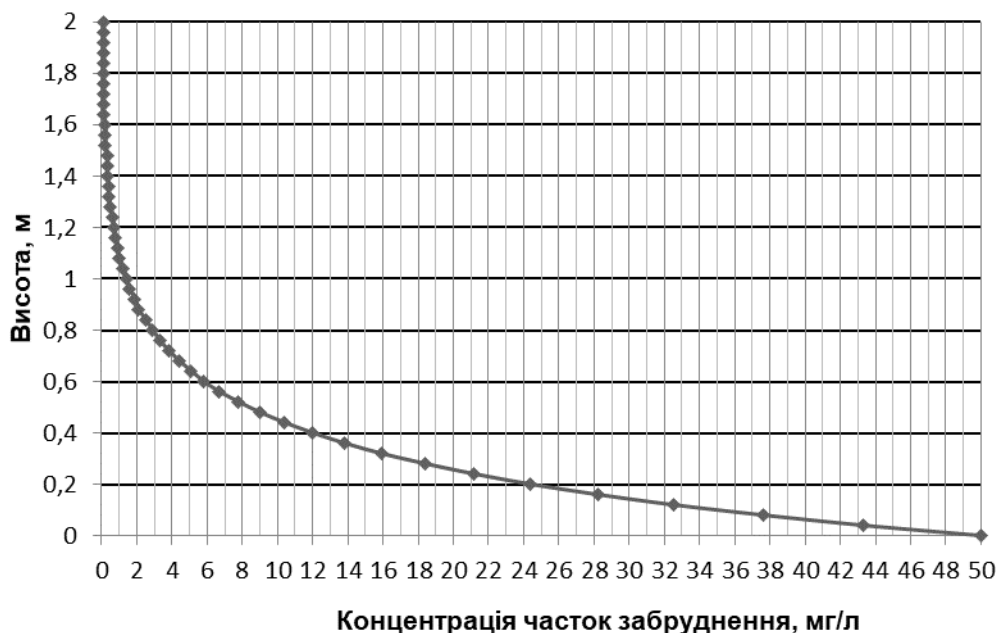


Рис.2. Залежність концентрації завислих часток у воді від висоти флотаційної камери

Отже, можна припустити, що приєднання завислої частки до бульбашки відбувається не миттєво після утворення бульбашки, а тільки через деякий час на висоті приблизно 0,15 м.

Подальша наша робота спрямована на математичному моделюванні напірної флотації при очищенні малокаламутних кольорових вод з урахуванням технологічних параметрів процесу.

Список літератури

1. *Сироватський О.А.* Експериментальне дослідження очистки малокаламутних кольорових вод / О.А. Сироватський, О.Г. Гайдучок // Міжнародний конгрес та технічна виставка «ЕТЕВК-2017»: збірка доповідей міжнародного конгресу м.Черноморськ. К.: ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», 2017. С.102-103.
2. *Сироватський О.А.* Метод очистки малокаламутних кольорових вод і методика проведення досліджень / Сироватський О.А., Сізова Н.Д., Фірман В.М., Гайдучок О.Г. // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. № 4 (86). С. 228-231.
3. *Епоян С.М.* Водопостачання та очистка природних вод: Навчальний посібник / [С.М. Епоян, В.Д. Колотило, О.Г. Друшляк та ін.]. Харків: Фактор, 2010. 192 с.
4. «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною»: ДСанПіН 2.2.4-171-10: Затв. Міністерством охорони і здоров'я України №400 від 12.05.2010: Чинний з 01.06.2010 р.
5. *Беликова С.Е.* Водоподготовка: Справочник. /Под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С.Е. Беликова. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.
6. *Василенко А.А.* Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення. Навчальний посібник / [А.А. Василенко, П.А. Грабовський, Г.М. Ларкіна та ін.]. К.:КНУБА, 2007. 299 с.
7. *Эпоян С.М.* О целесообразности предочистки перед устройства мимикро- и ультрафильтрации / С.М.Эпоян, А.С. Карагяур, А.Э. Голубка // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки. Ровно:НУВГП, 2015. №1(69). С. 24 -32.
8. *Кофман В.Я.* Напорная флотация в водоподготовке (обзор зарубежных изданий) / Кофман В.Я. // Водоснабжение и санитарная техника. М.: ВСТ, 2013. №5. С.44-46.
9. *Schofield T.* Dissolved air flotation in drinking water production / T. Schofield // Water Science and Technology. IWA Publishing, 2001. Vol. 43 (8). P.9-18.
10. *Hargesheimer E.E.* Drinking watertreatment options for taste and odorcontrol / E.E. Hargesheimer, S.B. Watson // Water Research. Volume 30, Issue 6, June 1996, Pages 1423-1430.

11. *Bourgeois J.C.* Treatment of drinking water residuals: comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratio / J.C. Bourgeois, M.E. Walsh, G.A. Gagnon // *Water Research*. Volume 38, Issue 5, March 2004, Pages 1173 – 1182.

12. *Clarifying* treatment dissolved air flotation provides alternative for treating raw water with light particles /

<http://www.waterworld.com/articles/print/volume-29/issue-8/editorial-features/clarifying-treatment.html>

13. *Henderson R. K., Parsons S. A., Jefferson B.* The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae // *WaterResearch*. 2008. № 42. P. 1827–1845.

14. *Рубинштейн Ю. Б., Филиппов Ю.А.* Кинетика флотации / Ю.Б. Рубинштейн, Ю.А. Филлипов . М.: Недра, 1980. 375 с.

15. *Годэн А.* Флотация / А. Годэн // Перевод с английского под. общей редакцией проф. докт. техн. наук О. Богданова и канд. техн. наук Е. Даниловой. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по горному делу, 1959. 660 с.

Стаття надійшла до редакції 8.12.17