

7. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. М.: Гос.изд. физ-мат.лит. 1963. 432 с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967. 460с.
9. Эйнштейн А. О гравитационных волнах. Сборник научных трудов. М: Наука, 1965. Т. 1. 700 с.
10. Симонов И.Н., Трофимович В.В. Особенности формирования живой материи и влияние континуальных электромагнитных полей окружающей среды // Екологічна безпека та природокористування. К., 2015. №2(18), С. 76–87.
11. Симонов И.Н., Трофимович В.В. Самосогласованные поля живой материи. // Екологічна безпека та природокористування КНУБА К., 2012. Вип. 11. С.174–186
12. Симонов И.Н., Панова Е.В. Роль самосогласованных (континуальных) полей водных сред в формировании живой материи // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2011. Вип.16. С.6-12.

Надійшло до редакції 26.09.2016

УДК 628.16.066.1

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

ОСНОВНІ МАТЕМАТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗРАХУНКУ ФЛОТАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ

За допомогою математичних закономірностей флоटाційного процесу та основних факторів, які впливають на процес очистки, визначена математична модель очистки напірною флотацією мало каламутних кольорових вод для питного водопостачання.

Ключові слова: флоटाційний процес, константа швидкості, зближення, концентрація, експериментальна установка.

С помощью математических закономерностей флотационного процесса и основных факторов, которые влияют на процесс очистки, определена математическая модель очистки напорной флотацией маломутных цветных вод для питьевого водоснабжения.

Ключевые слова: флотационный процесс, константа скорости, сближение, концентрация, экспериментальная установка.

By mathematical laws of the flotation process and the main factors that affect the cleaning process, show a mathematical model cleaning by dissolved air flotation turbidity colored waters for drinking supply.

Keywords: flotation process, the rate constant, convergence, concentration, experimental installation.

Сутність флотаційного процесу полягає в специфічній дії молекулярних сил між бульбашкою та часткою, що викликають злипання у воді газу (повітря) і твердої завислої частки, утворення на поверхні пінного шару. В потоці води бульбашка наближається до частки забруднення, яка має гідрофобну поверхню. Тонкий шар, що їх розділяє, стає нестійким і розривається. Внаслідок цього, короткочасний контакт може призвести до злиття бульбашки і частки, а під дією підйомної сили агрегат, що утворився, буде прямувати на поверхню [1,50; 2,11].

Основою розрахунків флотаційних процесів є закон збереження маси: у всякій замкнутій системі маса залишається постійною незалежно від того, яких змін зазнають речовини в цій системі [2,11; 3,5] Відносно флотації, цей закон можна сформулювати так: сума вихідних компонентів повинна дорівнювати сумі виходу незалежно від того, яким змінам вони піддавалися у флотаційній установці.

За даними вчених І. Плаксіна, В. Классена і Г. Бергера, цей закон вважається теоретичною основою рівняння швидкості флотації [3,7]. Він полягає в тому, що швидкість виносу часток в піну пропорційно концентрації повітряних бульбашок і твердих частинок:

$$\frac{dC}{dt} = -KN^m C^n, \quad (1)$$

де: N – концентрація повітряних бульбашок; C – масова концентрація часток; m і n – показники порядку флотації за повітрям і твердою речовиною, а їх сума вважається порядком флотаційної системи загалом; K – константа швидкості, що показує з якою швидкістю йде процес флотації.

Знак характеризує зменшення концентрації часток в камері внаслідок виносу в піну.

Найпростіший випадок, утворення агрегату з бульбашки та частки, можливий, якщо $m = 1$ та $n = 1$, тобто, коли одна бульбашка повітря приєднується до однієї твердої частки. Тоді порядок флотаційної системи дорівнює $m + n = 1 + 1 = 2$. Також можливі випадки, коли бульбашка стикається не з однією, а з $n > 1$ частками, або коли частка закріплюється на двох і більше бульбашках ($m > 1$). У цьому випадку порядок буде $(n + 1)$ і $(m + 1)$ відповідно. Однак, ймовірність того що $m + n > 1$, дуже мала [3,7].

Якщо вважати, що нестачі вільної поверхні рідина-газ в камері немає, то можна знехтувати зміною концентрації повітряних бульбашок ($m = 0$), а найбільш ймовірно буде зіткнення бульбашки з однією часткою ($n = 1$), то рівняння (1) буде мати вигляд:

$$\frac{dC}{dt} = -KC. \quad (2)$$

Кінетичне рівняння флотації записують не в концентраціях твердих часток, а увилучених (різниця концентрацій часток у вихідній і очищеній водах). Тому рівняння (2) прийме вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{c_0 - c(t)}{c_0} \text{ або } \frac{c(t)}{c_0} = 1 - \varepsilon(t). \quad (3)$$

Підставивши умову (3) в рівняння (2), отримаємо:

$$\frac{d(c_0 - c(t))}{dt} = -K(C_0 - C(t)); \quad (4)$$

$$\frac{d(1 - \frac{c(t)}{c_0})}{dt} = -K(1 - \frac{c(t)}{c_0}); \quad (5)$$

$$\frac{d(1 - \varepsilon(t))}{dt} = -K(1 - \varepsilon(t)); \quad (6)$$

$$\frac{d(1 - \varepsilon(t))}{(1 - \varepsilon(t))} = -K dt. \quad (7)$$

Після інтегрування рівняння (7) має вигляд:

$$\ln(1 - \varepsilon(t)) = \ln e^{-Kt}; \quad (8)$$

$$\varepsilon(t) = 1 - e^{-Kt}. \quad (9)$$

У теорії флотації приймається представлення про константу флотаційного процесу у вигляді добутків умовних ймовірностей, що характеризують окремі стадії процесу [3,10; 4, 40].

Вченими Р. Шуманом, К.Ф. Белоглазовим, О.С. Богдановим були запропоновані різні варіанти розбиття процесу, однак, найбільш широке застосування отримав варіант розбиття процесу на два послідовних етапи: зближення частки з бульбашкою, здійснюваного за рахунок гідродинамічних факторів, і прилипання, що відбувається за рахунок поверхневих сил [3,12; 5,26].

У математичному вигляді даний варіант записується так:

$$K = P_{CN} P_a P_e P_f, \quad (10)$$

де P_{CN} – ймовірність зіткнення в одиницю часу однієї частки з будь-якою бульбашкою, що знаходяться в одиниці об'єму; P_a – ймовірність прилипання бульбашки до частки при зіткненні; P_e – ймовірність стійкого закріплення частки до бульбашки до виносу в піну; P_f – ймовірність виходу частки з піни в концентрат.

В подальшому для спрощення розрахунків, прийнято, що ймовірність прилипання бульбашки до частки при зіткненні (P_a) та ймовірність стійкого закріплення частки до бульбашки до виносу в піну (P_e) об'єднані в одну ймовірність: $P_{ae} = P_a P_e$ і розраховується за наступною формулою:

$$P_{ae} = \frac{dC_{закр}}{dC_{зітк}}, \quad (11)$$

де $C_{закр}$ – кількість закріплених часток на бульбашці; $C_{зітк}$ – кількість часток, що зіткнулися з бульбашкою.

Відношення числа часток, що вийшли в концентрат до числа часток, винесених в піну є ймовірністю виходу часток з піни в концентрат:

$$P_f = \frac{d(C_0 - C)}{dC_{закр}}. \quad (12)$$

Багато авторів запропонували своє бачення ймовірності зіткнення, але, на нашу думку, ймовірність, яка була запропонована О.С. Богдановим, включає в себе більше повну сукупність факторів, які можна змінювати [2,13]. Це дозволить застосувати цю формулу для вирішення проблем очистки напірною флотацією відносно малокаламутних кольорових вод.

Ймовірність зіткнення в одиницю часу однієї частки [6,150] розраховується так:

$$P_{CN} = \frac{3qL(d+d_1)}{2VD^2} \left(\frac{b_1}{b_3} + 3 \right), \quad (13)$$

де q – витрата повітря; L – середня відстань бульбашки, яка проходить до моменту зіткнення с часткою; d – діаметр частки; $d_1 = 2a_1$, де a_1 – відстань від центра частки до границі зони, в якій неможливо знехтувати повеневими силами; b_1, b_3 – коефіцієнти швидкості падіння частки (за Стоксом) та спливання бульбашки; D – діаметр бульбашки; V – об'єм зони перемішування, заповнена частками.

Витрата повітря розраховується:

$$q = pB(1 - e^{-kt}), \quad (14)$$

де p – тиск насичення; B – розчинність повітря у воді; k – константа швидкості розчинення.

Тиск впливає не тільки на кількість повітря, яке може розчиниться у воді, але і на розмір самих бульбашок (D). Такий тиск повинен коливається в досить широких межах від $3 \cdot 10^5$ до $9 \cdot 10^5$ Па, адекватно характеристиці суспензії, що видаляється (крупність часток забруднення, які обумовлюють каламутність та кольоровість, знаходиться в межах $10^{-6} \dots 10^{-3}$ м) [7,212].

Коефіцієнт швидкості падіння частки та спливання бульбашки визначається за законами Стокса: якщо частки падають у в'язкій рідині під дією власної ваги, то стала швидкість досягається, коли ця сила тертя спільно з силою Архімеда точно врівноважуються силою гравітації [8,89]. В загальному випадку цей закон записується:

$$V_s = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g (\rho_{\text{час}} - \rho_{\text{рід}})}{\eta}, \quad (15)$$

де r – радіус Стокса частки; g – прискорення вільного падіння; $\rho_{\text{час}}$, $\rho_{\text{рід}}$ – густина частки та рідини відповідно; η – динамічна в'язкість рідини.

В нашому випадку: $V_1 = b_1$ і $V_2 = b_3$, але вони мають різні значення, бо частка забруднення прямує вниз ($\rho_{\text{час}} > \rho_{\text{рід}}$), а бульбашку повітря вгору ($\rho_{\text{бул}} < \rho_{\text{рід}}$).

Тоді:

$$P_{CN} = \frac{3pB(1 - e^{-kt}) \cdot L \cdot (d + 2a_1)}{2VD^2} \left(\frac{\frac{2}{9} \frac{r_1^2 g (\rho_{\text{час}} - \rho_{\text{рід}})}{\eta}}{\frac{2}{9} \frac{r_2^2 g (\rho_{\text{бул}} - \rho_{\text{рід}})}{\eta}} + 3 \right) = \frac{3pBL(1 - e^{-kt})(d + 2a_1)}{2VD^2} \times \left(\frac{r_1^2 (\rho_{\text{час}} - \rho_{\text{рід}})}{r_2^2 (\rho_{\text{бул}} - \rho_{\text{рід}})} + 3 \right), \quad (16)$$

де r_1, r_2 – радіус частки та бульбашки.

Якщо замінити радіус частки та бульбашки на їх діаметри, та виконати перетворення, то будемо мати:

$$P_{CN} = \frac{3(pBLd^2(1-e^{-kt})(d+2a_1)(\rho_{\text{час}}-\rho_{\text{рід}})+D^2(\rho_{\text{б}}-\rho_{\text{рід}}))}{2VD^4(\rho_{\text{б}}-\rho_{\text{рід}})} \quad (17)$$

Таким чином, константа флотаційного процесу має вигляд:

$$K = \frac{3(pBLd^2(1-e^{-kt})(d+2a_1)(\rho_{\text{час}}-\rho_{\text{рід}})+D^2(\rho_{\text{б}}-\rho_{\text{рід}}))}{2VD^4(\rho_{\text{б}}-\rho_{\text{рід}})} \times \frac{dC_{\text{закр}}}{dC_{\text{зітк}}} \times \frac{d(C_0-C)}{dC_{\text{закр}}} \quad (18)$$

або

$$K = \frac{3(pBLd^2(1-e^{-kt})(d+2a_1)(\rho_{\text{час}}-\rho_{\text{рід}})+D^2(\rho_{\text{б}}-\rho_{\text{рід}}))}{2VD^4(\rho_{\text{б}}-\rho_{\text{рід}})} \times \frac{d(C_0-C)}{dC_{\text{зітк}}} \quad (19)$$

Для практичної перевірки отриманої математичної закономірності була побудована експериментальна установка очищення напірною флотацією мало каламутної кольорової води. Дослідження планується проводити на штучній воді. В якості замунювача використовується синьо-зелена глина, яка дозволяє отримати необхідні розміри часток забруднення.

На рис.1 наведена технологічна схема експериментальної установки для очищення малокаламутної кольорової води.

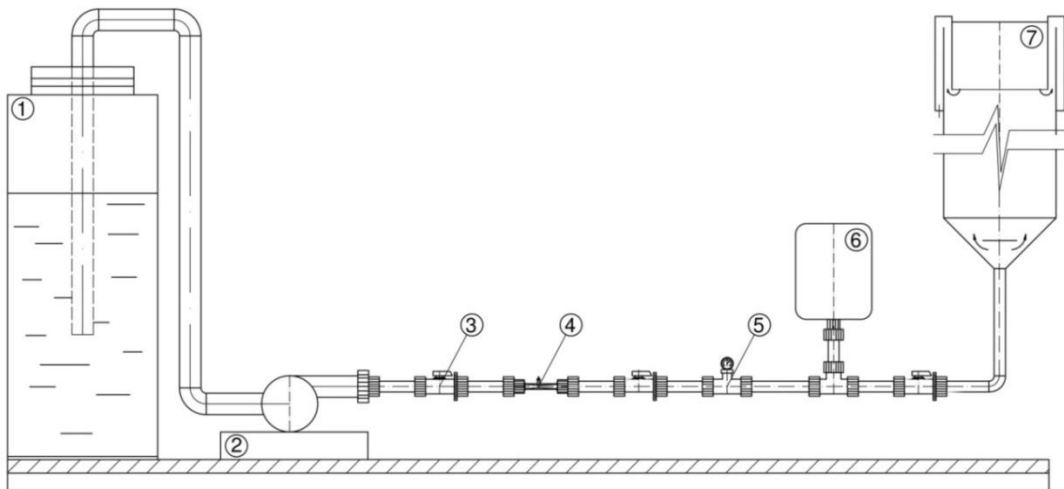


Рис. 1. Технологічна схема експериментальної установки для очищення малокаламутної кольорової води:

- 1 – бак вихідної води; 2 – насос; 3 – шаровий кран; 4 – ежектор; 5 – манометр;
6 – бак насичення; 7 – флотаційний резервуар (флотатор)

Продуктивність експериментальної установки $Q = 80 \dots 120$ л/год.

Вихідна вода з баку (1) ($W_{\text{б}} = 200$ л) насосом (2) (з продуктивністю до 40 л/хв та напором до 0,8 МПа) подається в бак насичення (6) ($W_{\text{бак насичення}} = 80$ л). Під час транспортування води, за допомогою ежектора (4) відбувається підсмоктування в потік повітря та інтенсивне його перемішування. Після потраплення в бак насичення, вода насичується

повітрям під тиском 0,4...0,8 МПа протягом 5 хвилин. Насичена водоповітряна суміш, яка утворилась, направляється у відкритий флотаційний резервуар (7). Флотатор має циліндричну форму діаметром 0,2 м і висотою 2 м. Циліндрична форма зроблена для рівномірного розподілу бульбашок по резервуару.

Передбачається подальше регулювання тиску в баку за допомогою манометру. Це дозволить наситити максимальною кількістю повітрям задану воду.

Таким чином, подальша робота буде спрямована на практичне дослідження математичної моделі та перевірки параметрів, що впливають на ефективну очистку напірною флотацією малокаламутних кольорових вод.

Список літератури

1. *Абрамов А.А.* Флотационные методы обогащения: Учебник для вузов. М.: Недра, 1984. – 383 с.

2. *С. Эпоян, А. Сыроватский, А. Гайдучок.* Моделирование процесса флотационной очистки маломутных цветных вод // Motrol. Comission of motorization and energerics in agriculture. Lublin-Rzeszow, 2016. Vol. 18 No 6. P. 11-18.

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

4. *Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернышев.* Теоретические основы очистки воды: учебное пособие. Донецк: изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2009. 298 с.

5. *Б.В. Дерягин, С.С. Духин, Н.Н. Рулев.* Микрофлотация: Водоочистка, обогащение. М.: Химия, 1986. 112 с.

6. *О.С. Богданов, И.В. Максимов, А.К. Поднек, Н.Л. Янис.* Теория и технология флотации руд. М.: Недра, 1990. 367 с.

7. *А.А. Сыроватский, С.П. Бабенко, А.Г. Гайдучок, Ю.М. Рыбачук.* Пути повышения эффективности очистки природных маломутных цветных вод методом напорной флотации // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. № 2 (80). С. 209-213.

8. *Годэн А.* Флотация. // 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.

Надійшло до редакції 18.11.2016