DOI: https://doi.org/10.31073/mivg201902-183
Available at (PDF): http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/183
УДК 628.1

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІНОПОЛІСТИРОЛЬНОГО ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ

Д.В. Чарний[1], докт. техн. наук, Ю.А. Онанко[2], аспірант
[1] Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
https://orcid.org/0000-0002-4632-0558; e-mail: dmitriych10@gmail.com
[2] Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;
https://orcid.org/0000-0002-7231-1188; e-mail: yaonanko1@gmail.com

Анотація. *Проведено аналіз початкової стадії фільтрування водної суспензії через чисте пінополістирольне фільтрувальне завантаження. Розглянута така особливість його роботи як гідросортування. Проаналізовано зв'язок розмірів гранул пінополістиролу з концентраціями електростатичного заряду на їх поверхні. При дослідженні параметрів електростатичної адсорбції колоїдних частинок на поверхні пінополістирольного фільтрувального завантаження, під час фільтрування через нього водної суспензії, виникає необхідність враховувати вплив неоднорідності гранулометричного складу фільтрувального завантаження на час завершення повного формування поверхневого шару з налиплих колоїдних частинок. Тобто на час завершення початкової стадії фільтрування - так званої «зарядки» фільтра. Експериментально встановлено, що на початковій стадії фільтрування, після промивки, відбувається гідросортування пінополістирольного завантаження за крупністю його гранул. Менші за діаметром гранули опускаються в нижню частину шару завантаження, а більші – піднімаються вверх до несправжнього дна фільтра. При цьому в процесі промивки частина найбільш дрібної «пилуватої» фракції виноситься з промивною водою. За допомогою теорії Пуасона-Больцмана показано зв'язок концентрації електростатичного заряду з товщиною подвійного електричного шару гранул спіненого полістиролу у водній суспензії. Обґрунтовано важливість дослідження ζ-потенціалу для контролю процесу фільтрування колоїдних суспензій. Проведено дослідження електростатичних властивостей колоїдів різної морфології. Визначено залежність ζ-потенціалу колоїдів різної морфології від сили взаємодії подвійного електричного шару колоїдної частинки з подвійним електричним шаром гранули пінополістиролу. Для перевірки гіпотези про зв'язок величини ζ-потенціалу колоїдів різного походження з величиною сили взаємодії їх подвійного електричного шару з подвійним електричним шаром гранули пінополістиролу були проведені експериментальні вимірювання ζ-потенціалу колоїдів біологічного, органічного і мінерального походження. Показано залежність часу «зарядки» полістирольного фільтра від величини ζ-потенціалу фільтрованих колоїдів.*

Ключові слова: *водоочищення, дзета-потенціал, фільтрування, зарядка фільтра, пінополістирол, гідросортування.*

Актуальність. Вода – унікальна природна речовина, яка при розгляді з точки зору електростатичної взаємодії є ідеально збалансованим диполем. Завдяки кулонівській взаємодії молекули води притягуються з тією ж силою, з якою і відштовхуються одна від одної. Даний ефект і забезпечує умови існування води в рідкому стані. На відміну від молекул води, в плані електростатичної взаємодії, колоїдні частинки, так само як і гранули спіненого полістиролу у водній суспензії, є системами, які постійно перебувають у розбалансованому стані. Відповідно до закону Кулона, вони постійно намагаються досягти балансу. Проте через особливості будови їх подвійних електричних шарів це відбувається на рівні взаємодії тільки окремих шарів системи. Наприклад між адсорбційним і дифузним шарами. Однак, при досягненні рівноваги між двома сусідніми шарами відбувається втрата балансу електростатичної рівноваги між іншими шарами, які межують із ними. Після чого інші шари починають намагатися відновити свою електростатичну рівновагу, тим самим виводячи з рівноваги інші шари і так далі. Досягнення такою системою стану електростатичної рівноваги можливе у разі втручання зовнішніх сил. Наприклад у результаті хімічної реакції, викликаної додаванням у суспензію коагулянтів або флокулянтів [1]. Тоді подвійні електричні шари руйнуються і колоїдні частинки починають злипатися, утворюючи великі пластівці, які осідають під дією сил гравітації.

Метою даної роботи є визначення ступеня впливу електростатичних властивостей гранул

© Д.В. Чарний, Ю.А. Онанко, 2019

спіненого полістиролу на процес затримання колоїдних частинок різної природи на їх поверхні при фільтруванні через них водної суспензії.

Обґрунтування важливості дослідження параметрів електростатичної адсорбції при фільтруванні водних суспензій. Ступінь розбалансованості та взаємодії з іншими електростатичними системами у водній суспензії визначає шар потенціалутворюючих іонів, що формується навколо ядра системи [2]. Він визначає знак та переважну частину величини заряду подвійного електричного шару системи. Його прийнято визначати за допомогою такої фізичної величини як електростатичний або ζ-потенціал [3]. Тому дослідження ζ-потенціалу є ключовим для визначення ступеня взаємодії колоїдних частинок та гранул пінополістирольного завантаження при фільтруванні через нього водних суспензій [4-6].

Для поверхневих природних вод, як складних колоїдних систем, характерна від'ємна зарядженість ζ – потенціалу колоїдів, що обумовлюють каламутність вихідної води. Це підтверджується нашими експериментальними дослідженнями поверхневих вод верхньої течії р. Дністер, за результатами яких величина ζ – потенціалу колоїдів у даній воді складає –9,41 мВ. Пінополістирол є хімічно-інертним завантаженням [7] з додатнім ζ – потенціалом, що складає +2 мВ [8; 9], тому адсорбція колоїдних частинок відбувається за рахунок різниці потенціалів. Найбільш наочно це видно на прикладі затримання конгломератів ціанобактерій [8].

При дослідженні параметрів електростатичної адсорбції колоїдних частинок на поверхні пінополістирольного фільтрувального завантаження, під час фільтрування через нього водної суспензії, виникає необхідність враховувати вплив неоднорідності гранулометричного складу фільтрувального завантаження на час завершення повного формування поверхневого шару з налиплих колоїдних частинок. Тобто на час завершення початкової стадії фільтрування – так званої «зарядки» фільтра [10].

Експериментально встановлено, що на початковій стадії фільтрування, після промивки, відбувається гідросортування пінополістирольного завантаження за крупністю його гранул. Менші за діаметром гранули опускаються у нижню частину шару завантаження, а більші – піднімаються уверх до несправжнього дна фільтра. При цьому в процесі промивки частина найбільш дрібної «пилуватої» фракції виноситься з промивною водою [11]. Це відбувається через те, що менші за діаметром гранули пінополістиролу вкриваються товщим шаром колоїдних частинок, що різко збільшує їх масу і призводить до втрати позитивної плавучості гранул та їх подальшого осідання на дно фільтра. Даний процес пов'язаний з тим, що гранули пінополістиролу меншого діаметра мають більшу концентрацію електростатичного заряду ніж гранули пінополістиролу більшого діаметра. Схему гранул спіненого полістиролу різного діаметра з шарами налиплих колоїдних часток різної товщини представлено на рисунку 1.

Визначення товщини подвійного електричного шару пінополістирольної гранули. Відповідно до теорії Пуассона-Больцмана, товщина подвійного електричного шару тісно пов'язана зі щільністю поверхневого заряду. Рівняння Пуассона-Больцмана є головним рівнянням для теорії подвійного електричного шару [12]. Розв'язок цього рівняння потрібен для обчислення товщини подвійного електричного шару. Теорія Пуассона-Больцмана є усталеною моделлю в широкому спектрі наукових досліджень. В електрохімії вона відома як теорія Гуї-Чепмена; у хімії розчинів – як теорія Дебая-Хюкеля; у колоїдній хімії – як теорія Дерягіна – Ландау – Фервея – Овербека (ДЛФО); і в біофізиці вона відома як теорія Пуассона-Больцмана. Рівняння Пуассона-Больцмана становить собою типову неявну модель розчинника і дає спрощений опис континууму розподілу дискретних частинок (наприклад води, іонів і молекул білків) у розчині. Чисельними методами, що використовуються для розв'язання

Рис. 1 Схема гранул пінополістиролу різного діаметра з шарами налиплих колоїдних часток

рівняння Пуассона-Больцмана, є: метод скінченних елементів; метод скінченних різниць; гібридний метод скінченних елементів/граничних елементів; гібридний метод скінченних різниць/граничних елементів. При розв'язанні рівняння Пуассона-Больцмана, коли для спрощення не враховуються члени вищого порядку розширеної експоненціальної функції, це не дає точного результату і розв'язок є наближеним. Чепмен (1913) та Гуї (1910) надали наближений розв'язок рівняння Пуассона-Больцмана для одного типу іонів. Воюцький надав наближений розв'язок лінеаризованого рівняння Пуассона-Больцмана для випадку, коли в ґрунтовій воді міститься більше одного типу іонів. Щільності переважної більшості відповідних частинок залежать від відстані до зарядженої площини [13]:

$$n_{ct}(x)=\frac{n_s n_d \exp\left(-\frac{v_{ct}e_0\Phi(x)}{kT}\right)}{n_{0d}\left(1+\frac{n_d}{n_{0d}}\left(\exp\left(-\frac{v_{ct}e_0\Phi(x)}{kT}\right)+\exp\left(-\frac{v_{co}e_0\Phi(x)}{kT}\right)\right)\right)}, \quad (1)$$

$$n_{co}(x)=\frac{n_s n_d \exp\left(-\frac{v_{co}e_0\Phi(x)}{kT}\right)}{n_{0d}\left(1+\frac{n_d}{n_{0d}}\left(\exp\left(-\frac{v_{ct}e_0\Phi(x)}{kT}\right)+\exp\left(-\frac{v_{co}e_0\Phi(x)}{kT}\right)\right)\right)}, \quad (2)$$

де n_{0d} – щільність переважної більшості молекул розчинника віддалених від зарядженої площини, n_d – щільність переважної більшості протиіонів та іонів віддалених від зарядженої площини, v_{ct} і v_{co} – валентності протиіонів та іонів відповідно, $v_{ct}, v_{co} = \pm 1$, e_0 – елементарний заряд, $\Phi(x)$ – потенціал середнього електростатичного поля, k – константа Больцмана, T – температура.

Середній електростатичний потенціал отримують шляхом розв'язання диференціального рівняння:

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2}=-\frac{e_0 n_s n_d\left(v_{ct}\exp\left(-\frac{v_{ct}e_0\Phi(x)}{kT}\right)+v_{co}\exp\left(-\frac{v_{co}e_0\Phi(x)}{kT}\right)\right)}{\varepsilon\varepsilon_0 n_{0d}\left(1+\frac{n_d}{n_{0d}}\left(\exp\left(-\frac{v_{ct}e_0\Phi(x)}{kT}\right)+\exp\left(-\frac{v_{co}e_0\Phi(x)}{kT}\right)\right)\right)}, \quad (3)$$

де ε – діелектрична проникність розчину, а ε_0 – константа впливу. Граничними умовами для рівняння (3) є:

$$\left.\frac{d\Phi}{dx}\right|_{x=0}=-\frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (4)$$

$$\left.\frac{d\Phi}{dx}\right|_{x=d}=0 \quad (5)$$

Приймаємо:

$$\Phi(d)=0 \quad (6)$$

Відповідно, d слід вважати дуже великим, тобто $d \to \infty$.

Екранування електростатичного поля протиіонами, що накопичуються поблизу зарядженої площини, може бути представлене ефективною товщиною подвійного електричного шару. Відстань $x_{1/2}$, де щільність переважної більшості протиіонів (розрахованих відносно їх значення на віддалі від зарядженої площини), зменшується до половини від їх значення при $x = 0$:

$$n_{ct}\left(x_{\frac{1}{2}}\right)-n_d=\frac{1}{2}\left(n_{ct}(0)-n_d\right), \quad (7)$$

де $n_{ct}(0)$ – щільність переважної більшості протиіонів при $x = 0$.

Тут ми узагальнюємо цю умову так, щоб розглянути кінцеву розмірність гратки на відстані найближчого наближення іонів $a/2$ і потребуємо зменшення частини ϑ величини $n_{ct}(a/2)$:

$$n_{ct}(x_\vartheta)-n_d=(1-\vartheta)(n_{ct}(a/2)-n_d) \quad (8)$$

Введемо інший показник товщини подвійного електричного шару, а саме відстань d_ϑ, що визначає область, яка містить певну частину ϑ надлишку протиіонів:

$$\int_{a/2}^{d_\vartheta}\left(n_{ct}(x)-n_d\right)dx=\vartheta\int_{a/2}^{d}\left(n_{ct}(x)-n_d\right)dx \quad (9)$$

Для іонів, розмір яких зменшується (в межах дії теорії Пуассона-Больцмана), x_ϑ аналітично виражається як:

$$x_\vartheta=\frac{1}{k}\ln\left[\frac{\left(\sqrt{1+(1-\vartheta)\left(\exp\left(\frac{-v_{ct}e_0\Phi(0)}{kT}\right)-1\right)}+1\right)\times\left(1-\exp\left(\frac{v_{ct}e_0\Phi(0)}{2kT}\right)\right)}{\left(\sqrt{1+(1-\vartheta)\left(\exp\left(\frac{-v_{ct}e_0\Phi(0)}{kT}\right)-1\right)}-1\right)\times\left(1+\exp\left(\frac{v_{ct}e_0\Phi(0)}{2kT}\right)\right)}\right], \quad (10)$$

де

$$\Phi(0)=-\frac{2kT}{v_{ct}e_0}\ln\left(\sqrt{1+(\sigma/c)^2}+|\sigma|/c\right) \quad (11)$$

$$c = \sqrt{8kT\varepsilon\varepsilon_0 n_d} \qquad (12)$$

$$k = \sqrt{\frac{2n_d e_0^2}{\varepsilon\varepsilon_0 kT}} \qquad (13)$$

При дотриманні тієї ж межі і з урахуванням того, що $d \to \infty$, параметр d_ϑ виражається як:

$$d_\vartheta = \frac{1}{k}\ln\left(\frac{1+\frac{1+\vartheta}{1-\vartheta}exp\left(\frac{v_{ct}e_0\Phi(0)}{2kT}\right)}{1+exp\left(\frac{v_{ct}e_0\Phi(0)}{2kT}\right)}\right) \qquad (14)$$

Якщо крім того $\left|e_0\Phi(x)/kT\right| \ll 1$ для всіх x, тобто застосовується лінеаризована теорія Пуассона-Больцмана, обидві умови ще більше спрощують вираз:

$$x_\vartheta = d_\vartheta = \frac{1}{k}\ln\left(\frac{1}{1-\vartheta}\right), \qquad (15)$$

де $1/k$ – довжина екранування Дебая, яка описує ефективну товщину подвійного електричного шару в лінеаризованій теорії Пуассона-Больцмана.

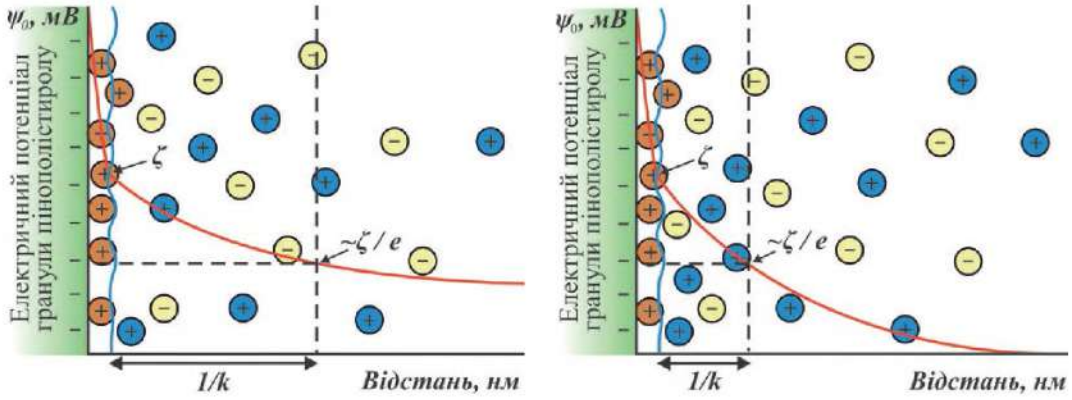
У рамках представленої моделі ділянки гратки рівні; отже всі частинки вважаються однаковими за розміром. Без цього припущення чисельні щільності іонів не могли бути виражені аналітично (як за рівняннями (1) і (2)). Тому в моделі всі частинки мають однаковий розмір. На віддалі від зарядженої площини електростатичне поле не залежить від постійної гратки. З іншого боку, в безпосередній близькості від зарядженої площини накопичуються протиіони, у той час як іонів не вистачає. Найбільш важливим є вплив протиіонів, що містяться в області, близькій до зарядженої площини в електростатичному полі. Тому ми вважаємо доречним вибирати постійну решітки a за розміром протиіонів у розчині. Різні розв'язки, що характеризуються типом протиіонів, можуть бути змодельовані шляхом зміни постійної гратки a, що належить до відповідного виду протиіонів.

Для дослідження ефективної товщини подвійного електричного шару для різних розмірів протиіонів ми розв'язуємо рівняння (3), визначаємо функцію розподілу, задану рівнянням (1), та обчислюємо параметри x_ϑ і d_ϑ. Розв'язок рівняння (3) отримано чисельно за допомогою методу Рунге-Кутти четвертого порядку, починаючи на віддаленні від зарядженої площини, а інтеграл у рівнянні (9) обчислюється за допомогою методу Сімпсона.

Щільність іонів визначається тільки для $x > a/2$, тоді як електростатичне поле визначається для всіх $x \geq 0$ і підпорядковується умові у рівнянні (4). На основі складеної моделі були побудовані схеми зміни величини електричного потенціалу в залежності від відстані до поверхні частинки при різних товщинах подвійних електричних шарів. Вони представлені на рисунку 2, де ψ_0 – електричний потенціал поверхні гранули пінополістиролу, $1/\kappa$ – довжина подвійного електричного шару або Дебаївська довжина, а ζ – дзета-потенціал гранули спіненого полістиролу.

Підсумовуючи вищезазначене, час повного вкриття гранул пінополістирольного завантаження кіркою з колоїдних частинок, тобто так званої «зарядки» фільтра, визначається товщиною подвійного електричного шару.

Гранули меншого діаметра повністю вкриваються кіркою швидше через більшу концен-



а б

Рис. 2 Схеми зміни величини електричного потенціалу залежно від відстані до поверхні гранули пінополістиролу при різних товщинах подвійних електричних шарів:
а – більша товщина подвійного електричного шару;
б – менша товщина подвійного електричного шару

трацію електростатичного заряду. Але через те, що вони мають більшу товщину подвійного електричного шару, кірка з колоїдних частинок на їх поверхні буде більшої товщини, а відповідно і часу на її повне утворення буде вимагатися більше.

Гранули більшого діаметра повільніше вкриваються шаром колоїдних частинок через меншу концентрацію електростатичного заряду. Проте, товщина цього шару у них менша ніж у гранул меншого діаметра через меншу товщину подвійного електричного шару. А тому і часу на повне завершення формування кірки потрібно менше.

Дослідження електростатичних властивостей колоїдів різної морфології. Для перевірки гіпотези про зв'язок величини ζ-потенціалу колоїдів різного походження з величиною сили взаємодії їх подвійного електричного шару з подвійним електричним шаром гранули пінополістиролу були проведені експериментальні вимірювання ζ-потенціалу колоїдів біологічного, органічного і мінерального походження. Експериментально вивчено електрокінетичні властивості колоїдів біологічного походження на прикладі фітопланктону (головним чином конгломератів ціанобактерій), зразки якого були відібрані в районі Дніпровського водозабору м. Києва, Україна. Виміряне значення його ζ-потенціалу склало –13 мВ [8]. Властивості колоїдів мінерального походження були вивчені на прикладі глинистих частинок з поверхневих вод верхньої течії р. Дністер. Експериментально визначена величина їх ζ-потенціалу дорівнює –9,41 мВ. Також для визначення ступеня впливу додавання коагулянтів на електростатичні властивості глинистих колоїдних частинок були досліджені проби води, відібрані на очисних споруд водопроводу м. Чернівці, Україна. ζ-потенціал конгломератів глинистих колоїдів склав –11,7 мВ. Електрокінетичні властивості колоїдів органічного походження були досліджені на прикладі стічних вод, відібраних на очисних спорудах ТОВ «Антонівський м'ясокомбінат», який розташований в с. Мала Антонівка Білоцерківського району Київської області, Україна. Виміряна величина їх ζ-потенціалу –9,05 мВ.

Для визначення сили взаємодії подвійного шару $F_{пш}$ колоїдів різної морфології та гранули пінополістиролу у водній суспензії було застосовано, можливо, найбільш широко використовуваний аналітичний вираз Хогга, що має вигляд:

$$F_{пш} = \frac{\hat{\varepsilon} a_p \left(\zeta_к^2 + \zeta_n^2\right) k \exp(-kh)}{2\left(1-\exp(-2kh)\right)} \times \times \left[2\frac{\zeta_к \zeta_n}{\zeta_к^2 + \zeta_n^2} - \exp(-kh)\right]\mathbf{n}, \quad (16)$$

де $\hat{\varepsilon}$ – діелектрична проникність рідини, $\zeta_к$ та ζ_n – ζ-потенціали (апроксимація поверхневого потенціалу) колоїдної частинки і фільтрувального завантаження (гранули пінополістиролу) відповідно, **n** – одиничний нормальний вектор, а к – зворотна Дебаївська довжина, представлена як:

$$k = \sqrt{\frac{4\pi e^2}{\hat{\varepsilon} kT} \sum_j z_j^2 m_j}, \quad (17)$$

де e – заряд електрона, k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура, а m_j – концентрація виду j-го іона, присутнього в розчині з валентністю z_j.

На базі цих даних був побудований графік залежності ζ-потенціалу колоїдів різної морфології від сили взаємодії їх подвійного електричного шару з подвійним електричним шаром гранули пінополістиролу. Теоретична крива побудована відповідно до закону Кулона, а дані експериментальних досліджень колоїдів різної морфології представлені на графіку у вигляді експериментальних точок.

Аналіз графіка, представленого на рис. 3, підтверджує гіпотезу про наявність дуже

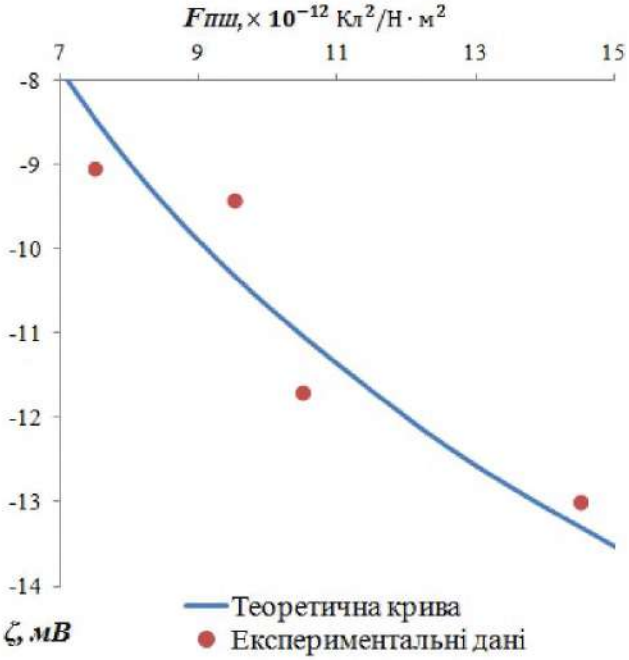


Рис. 3. Графік залежності ζ-потенціалу колоїдів різної морфології від сили взаємодії подвійного електричного шару колоїдної частинки з подвійним електричним шаром гранули пінополістиролу

тісного зв'язку між величиною ζ-потенціалу колоїдів різної морфології з величиною сили взаємодії їх подвійного електричного шару з подвійним електричним шаром гранули пінополістиролу у водної суспензії. Це означає, що час зарядки пінополістирольного фільтра тісно пов'язаний зі значеннями ζ-потенціалу колоїдів у фільтрованій водній суспензії. Також можна зробити висновок про те, що з точки зору електростатичної взаємодії додавання коагулянтів змінює параметри подвійного електричного шару, чим підвищує не тільки величину ζ-потенціалу колоїдів, але і силу взаємодії їх подвійного електричного шару з подвійним електричним шаром гранули фільтрувального пінополістирольного завантаження. Це позитивно позначається на інтенсифікації процесу затримання скоагульованих колоїдних конгломератів на поверхні фільтрувального завантаження зі спіненого полістиролу і скорочення часу формування колоїдної кірки, тобто часу «зарядки» фільтра.

Висновки. Початкова стадія фільтрування через чисте пінополістирольне завантаження значно відрізняється від основної стадії фільтрування через переважання сил електростатичної взаємодії.

Різниця в часі повного завершення формування колоїдних кірок на гранулах спіненого полістиролу різних діаметрів настільки незначна, що нею можна знехтувати і вважати цей час однаковим для пінополістирольних гранул різних діаметрів.

Незалежно від природи походження колоїдів інтенсивність їх затримання гранулами пінополістирольного фільтруючого завантаження, а отже і час «зарядки» пінополістирольного фільтра безпосередньо, залежать від величини їх ζ -потенціалу.

Бібліографія

1. Сериков Л.В., Шиян Л.Н., Тропина Е.А. Коллоидно-химические свойства соединений железа в природных водах // Известия Томского политехнического университета. Вып. 316, № 3. С. 28–33.
2. Ghernaout D. Controlling coagulation process: from zeta potential to streaming potential. American Journal of Environmental Protection. 2015. Vol. 4. № 5. P. 16–27.
3. Holmes M. Zeta potential measurement for water treatment coagulation control. Conference: Oz Water 2015. At: Adelaide, Australia. 2015. P. 8.
4. Adamczyk Z. Role of electrostatic interactions in particle adsorption. Advances in Colloid and Interface Science. 1996. Vol. 63. P. 41–149.
5. Morfesis A. Role of zeta (ζ) potential in the optimization of water treatment facility operations. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2009. Vol. 48. № 5. P. 2305–2308.
6. Nobbmann U. The role of zeta potential in the optimization of water treatment. NSTI-Nanotech 2010. 2010. Vol. 3. P. 605–607.
7. Журба М.Г. Водоочистные фильтры с плавающей загрузкой. Москва : 2011. 536 с.
8. Чарний Д.В. Розвиток теоретичних засад і удосконалення технологій очищення природних вод в системах сільськогосподарського водопостачання : дис. ... докт. техн. наук : 06.01.02 / Інститут водних проблем і меліорації НААН. Київ, 2017. 302 с.
9. Awet T.T. Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. Environmental Sciences Europe. 2018. Vol. 30. № 1.
10. Орлов В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. Рівне : НУВГП, 2005. 163 с.
11. Чарный Д.В. Усовершенствование способов водо– и энергосбережения в разветвленных ороссительно–обводнительных системах : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.05 / Институт гидротехники и мелиорации УААН. Киев, 1998. 148 с.
12. Mahanta K.K. Estimation of the electric double layer thickness in the presence of two types of ions in soil water. Applied Clay Science. 2014. Vol. 87. P. 212–218.
13. Bohinc K. Thickness of electrical double layer. effect of ion size. Electrochimica Acta. 2001. Vol. 46. № 19. P. 3033–3040.

References

1. Serykov, L.V., Shyian L.N., Tropyna E.A. (2010). Kolloidno-khimicheskiye svoystva soyedineniy zheleza v prirodnykh vodakh [Colloid-chemical properties of iron compounds in natural waters]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – News of Tomsk Polytechnic University, 316(3), 28–33. Tomsk. [in Russian].
2. Ghernaout, D. (2015). Controlling Coagulation Process: From Zeta Potential to Streaming Potential. American Journal of Environmental Protection, 4(5), 16–27. https://doi.org/10.11648/j.ajeps.s.2015040501.12

3. Holmes, M., Reeve, P., Pestana, C., Chow, C., Newcombe, G., West, J., & Water, S. (2015). Zeta potential measurement for water treatment coagulation control. Conference: Oz Water 2015. At: Adelaide, Australia, 8.

4. Adamczyk, Z., & Warszyński, P. (1996). Role of electrostatic interactions in particle adsorption. Advances in Colloid and Interface Science, 63, 41–149. https://doi.org/10.1016/0001-8686(95)00281-2.

5. Morfesis, A., Jacobson, A.M., Frollini, R., Helgeson, M., Billica, J., & Gertig, K.R. (2009). Role of Zeta (ζ) Potential in the Optimization of Water Treatment Facility Operations. Industrial & Engineering Chemistry Research, 48(5), 2305–2308. https://doi.org/10.1021/ie800524x.

6. Nobbmann, U., Morfesis, A., Billica, J., & Gertig, K. (2010). The Role of Zeta Potential in the Optimization of Water Treatment. 3, 605–607.

7. Zhurba, M.H. (2011). Vodoochistnyye fil'try s plavayushchey zagruzkoy [Water purification filters with floating load]. Moscow [in Russian].

8. Charny, D.V. (2017). Rozvytok teoretychnykh zasad i udoskonalennya tekhnolohiy ochyshchennya pryrodnykh vod v systemakh sil's'kohospodars'koho vodopostachannya [Development of theoretical principles and improvement of natural water treatment technology in agricultural water supply systems]. Doctor's thesis. Kyiv: Instytut vodnykh problem i melioratsiyi NAAN. [in Ukrainian].

9. Awet, T.T., Kohl, Y., Meier, F., Straskraba, S., Grün, A.-L., Ruf, T., & Emmerling, C. (2018). Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. Environmental Sciences Europe, 30(1). https://doi.org/10.1186/s12302-018-0140-6.

10. Orlov, V.O. (2005). Vodoochysni fil'try iz zernystoyu zasypkoyu. [Water-purifying filters with granular filler]. Rivne: NUVHP. [in Ukrainian].

11. Charny, D.V. (1998). Usovershenstvovaniye sposobov vodo– i energosberezheniya v razvetvlennykh orossitel'no–obvodnitel'nykh sistemakh [Improvement of water and energy saving methods in branched irrigation and watering systems]. PhD thesis. Kyiv: Institut gidrotekhniki i melioratsii UAAN. [in Russian].

12. Mahanta, K.K., Mishra, G.C., & Kansal, M.L. (2014). Estimation of the electric double layer thickness in the presence of two types of ions in soil water. Applied Clay Science, 87, 212–218. https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.11.007.

13. Bohinc, K., Kralj-Iglič, V., & Iglič, A. (2001). Thickness of electrical double layer. Effect of ion size. Electrochimica Acta, 46(19), 3033–3040. https://doi.org/10.1016/S0013-4686(01)00525-4.

Д.В. Чарный, Ю.А. Онанко

Анализ электростатических свойств пенополистирольной фильтрующей загрузки

Аннотация. *Проведен анализ начальной стадии фильтрования водной суспензии через чистую пенополистирольную фильтрующую загрузку. Рассмотрена такая особенность ее работы как гидросортировка. Проанализирована связь размеров гранул пенополистирола с концентрациями электростатического заряда на их поверхности. При исследовании параметров электростатической адсорбции коллоидных частиц на поверхности пенополистирольной фильтрующей загрузки, при фильтрации через неё водной суспензии, возникает необходимость учитывать влияние неоднородности гранулометрического состава фильтрующей загрузки на время завершения полного формирования поверхностного слоя из налипших коллоидных частиц, то есть на время завершения начального этапа фильтрования - так называемой «зарядки» фильтра. Экспериментально установлено, что на начальном этапе фильтрования после промывки в пенополистирольной загрузке происходит её гидросортировка по крупности гранул. Меньшие по диаметру гранулы опускаются в нижнюю часть слоя загрузки, а большие – поднимаются вверх к ложному дну фильтра. При этом в процессе промывки часть наиболее мелкой «пылеватой» фракции уносится с промывной водой. При помощи теории Пуасонна-Больцмана показана связь концентрации электростатического заряда с толщиной двойного электрического слоя гранул вспененного полистирола в водной суспензии. Обоснована важность исследования ζ-потенциала для контроля процесса фильтрования коллоидных суспензий. Произведено исследование электростатических свойств коллоидов различной морфологии. Определена зависимость ζ-потенциала коллоидов разной морфологии от силы взаимодействия двойного электрического слоя коллоидной частицы с двойным электрическим слоем гранулы пенополистирола. Для проверки гипотезы о связи величины ζ-потенциала коллоидов различного происхождения с величиной силы взаимодействия их двойного электрического слоя с двойным электрическим слоем гранулы пенополистирола были проведены экспериментальные измерения ζ-потенциала коллоидов биологического, органического и минерального происхождения. Показана зависимость времени «зарядки» пенополистирольного фильтра от величины ζ-потенциала фильтруемых коллоидов.*

Ключевые слова: *водоочистка, дзета-потенциал, фильтрование, зарядка фильтра, пенополистирол, гидросортировка.*

D.V. Charnyi, Yu.A. Onanko

Analysis of electrostatic properties of polystyrene foam filtration load

Abstract. *The analysis of the initial stage of the aqueous suspension filtration through clean polystyrene foam media carried out. Such feature of its work as hydro-sorting is considered. The relationship between the sizes of polystyrene foam granules and the concentrations of electrostatic charge on their surface analyzed. At studying the colloidal particles electrostatic adsorption parameters on the surface of polystyrene foam filtration media, when filtering an aqueous suspension through it, it becomes necessary to take into account the influence of the filtration media particle size distribution heterogeneity on the time of the adhered colloidal particles surface layer complete formation. That is, on the time of initial stage of filtering completion – so called filter "charging". Experimentally proved that on the initial stage of filtering, after flushing polystyrene foam media, it the process of hydro-sorting by granule size is take place. Granules of the smaller diameters descent to the bottom of the load layer and larger ones rise up to the false bottom of the filter. Wherein, during the flushing process, part of the smallest "dusty" fraction is carried away with the flushing water. Using the Poison-Boltzmann theory, a relationship between an electrostatic charge and an electric double layer of polystyrene foam granules in aqueous suspension showed. The importance of the ζ-potential researching for controlling of colloidal suspensions filtering process was justified. The electrostatic properties of different morphology colloids studied. The dependence of the different morphology colloids ζ-potential on the force of the colloidal particles electrical double layer interaction with the polystyrene foam granule electrical double layer was determined. To test the hypothesis about the connection of various origins colloids ζ-potential with interaction force magnitude of their electric double layer with the polystyrene foam granules electric double layer, experimental ζ-potential measurements of biological, organic and mineral origin colloids were made. The dependence of the polystyrene foam filter "charging" time from the ζ-potential of the filtered colloids is shown.*

Key words: *water treatment, zeta-potential, filtering, filter charging, polystyrene foam, hydro-sorting.*