

енергии активации. Все это позволяет регулировать реологические свойства на стадии изготовления красок или перед их применением.

**Ключевые слова:** акрил-стирольная дисперсия, алюмосиликатные полые микросферы, аэросил, тиксотропия, энергия активации.

**Demidov D.V., Saienko N.V., Popov Y.V, Bikov R.A., Umanska T.I. УМАНСКАЯ. RHEOLOGICAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF HIGHLY FILLED OF AQUAEUS DISPERSION OF STYRENE ACRYLATE.**

The article studies the rheological and energy characteristics of highly filled compositions of acryl-styrene aqueous dispersions. Thin-walled aluminosilicate hollow microspheres and highly dispersed amorphous silicon dioxide (Aerosil)

were used as fillers. As a result of thermodynamic studies, the activation energy of water-dispersion paints and varnishes was calculated depending on the content of fillers. It is established that an increase in the degree of filling with microspheres increases the viscosity of the acrylate-styrene dispersion, which leads to technological difficulties in its application. The introduction of aerosil allows to reduce the viscosity, to regulate the degree of thixotropy and leads to an increase in the value of the activation energy. All this allows you to adjust the rheological properties at the stage of manufacture of paints or before their use.

**Keywords:** acryl-styrene dispersion, aluminosilicate hollow microspheres, aerosil, thixotropy, activation energy.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-94-4-177-182

УДК 628.16.066.1

**Карагяур А.С., Сироватський О.А., Тітов А.А., Гайдучок О.Г.**

*Харківський національний університет будівництва та архітектури*

(вул. Сумська, 40, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: vkg.knusa@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-8868-3189>; <http://orcid.org/0000-0003-1002-8559>; <http://orcid.org/0000-0001-9330-8829>; <https://orcid.org/0000-0003-3139-9061>)

## **ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТАНТИ ФЛОТАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ДЛЯ ЧАСТОК, ЯКІ ОБУМОВЛЮЮТЬ КАЛАМУТНІСТЬ ПРИРОДНОЇ ВОДИ**

Розглянуто питання визначення числових значень коефіцієнта захоплення та константи флотаційного процесу для часток забруднення, які обумовлюють каламутність природної води. Показані залежності відношення розміру часток забруднення та розміру бульбашки на константу флотаційного процесу. Отримані числові значення дозволяють провести математичне моделювання напірно-флотаційного процесу очищення малокаламутних природних вод для господарсько-питного водопостачання.

**Ключові слова:** напірна флотація, константа флотаційного процесу, каламутність, частки забруднення, очищення природної води.

**Вступ.** Напірна флотація – це процес поділу в водних розчинах або суспензіях речовин, поверхні яких мають різні фізико-хімічні властивості. В ньому беруть участь три фази: рідка – розчин (вода), газоподібна – газ і тверда – частки твердого тіла. В якості газоподібної речовини, в більшості випадків, використовуються бульбашки повітря. Поділ в основному відбувається за рахунок здатності твердих частинок закріплюватися і утримуватися на межі поділу фаз внаслідок різних значень питомої поверхневої енергії частки, рідини і бульбашки повітря [1,2]. Спочатку флотаційні методи використовувалися переважно в гірській

промисловості: для збагачення і розподілення руд різних металів, твердого палива та неметалевих корисних копалин [3,4]. За рекомендації себе як ефективний метод поділу часток, які мають різні властивості, метод флотації став впроваджуватися на станціях очистки побутових і промислових стічних вод [5]. Перевагою такої технології є зниження концентрації поверхнево-активних (ПАВ) і органічних речовин, що сприяє подальшому очищенню води, покращує її загальний санітарний стан.

Широке застосування напірної флотації при очищенні промислових (побутових)

стічних вод стала поштовхом в провадженні його для очищення поверхневих вод для питного водопостачання [6].

Аналіз сучасних літературних джерел з очистки поверхневих вод показав перспективність використання напірної флотації як технології водопідготовки. Фізичні та хімічні властивості бульбашок повітря допомагають видалити з води завислі речовини, водорості, цисти *Giardia* та ооцисти *Cryptosporidium*, осади гідроксидів металів та природні органічні речовини. Впровадження установок напірної флотації дозволить зменшити площі очисних споруд та витрати реагентів.

До основних факторів, які впливають на процес очищення напірною флотацією можна віднести: тиск, температуру води, розчинність газу (повітря) у воді, час насичення, розмір частки забруднення та бульбашки. Відносно видалення таким методом часток забруднення, які обумовлюють каламутність та кольоровість, з води поверхневого джерела для господарсько-питного водопостачання, вбачається маловивченість впливу цих факторів на ефективність очищення, а також один на одного.

**Мета.** Мета роботи - визначення числових значень коефіцієнта захоплення ( $E$ ) та константи флотаційного процесу ( $K$ ) для часток забруднення, які обумовлюють каламутність природної води. Це дозволить математично змоделювати напірно-флотаційний процес очищення природних вод поверхневого джерела для господарсько-питного водопостачання, а також провести теоретичні дослідження впливу основних факторів на ефективність очищення.

**Основна частина.** Для вирішення цієї проблеми нами була запропонована математична модель, яка складається з наступних рівнянь:

1. Об'ємна концентрація повітряних бульбашок – кількість бульбашок, які утворюються в елементарній товщі  $dz$ :

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial (W_{\text{висхід.поток}} + U(z))b}{\partial z} = D_{\text{ib}} \frac{\partial^2 b}{\partial z^2}, \quad (1)$$

де  $W$  – швидкість висхідного руху води, м/с;  $U$  – швидкість спливання одиничної бульбашки, м/с;  $D_{\text{ib}}$  – коефіцієнт дифузії.

Початкову швидкість підйому одиничної бульбашки приймаємо за формулою Стокса:

$$U_{\text{бульб}} = \frac{g(\rho_{\text{вод}} - \rho_{\text{повітря}})d_{\text{бульб}}^2}{18\mu_{\text{вод}}}, \quad (2)$$

$\rho_{\text{вод}}$ ,  $\rho_{\text{повітря}}$  – густина води та повітря відповідно, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{бульб}}$  – діаметр бульбашки, м;  $\mu_{\text{вод}}$  – динамічна в'язкість води.

2. Концентрація завислих часток в цій же товщі  $dz$ :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + W \frac{\partial C}{\partial z} = D_{\text{ic}} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - bKC, \quad (3)$$

де  $K$  – константа напірно-флотаційного процесу.

Низкою вчених були розроблені методики для отримання числового значення константи флотаційного процесу для різних умов [1,2,7]. У математичному вигляді даний коефіцієнт записується як добуток ймовірностей дій при флотаційному контакті [1,8]:

$$K = P_{\text{CN}} P_a P_e P_f, \quad (4)$$

де  $P_{\text{CN}}$  – 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 [9-11]:

$$P_{ae} = \frac{dC_{\text{закр}}}{dC_{\text{зітк}}} \quad (5)$$

де  $C_{\text{закр}}$  – кількість закріплених часток на бульбашці;  $C_{\text{зітк}}$  – 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:

$$P_f = \frac{d(C_0 - C)}{dC_{закр}} \quad (6)$$

Числового значення цього коефіцієнта для часток забруднення, які обумовлюють каламутність води, в літературних джерелах немає, тому нами було висунуто припущення, що ця константа дорівнює ймовірності зіткнення в одиницю часу однієї частки з будь-якою бульбашкою, що знаходяться в одиниці об'єму ( $P_{CN}$ ):

$$K = P_{CN} \quad (7)$$

Ймовірність зіткнення в одиницю часу однієї частки з будь-якою бульбашкою, що знаходяться в одиниці об'єму ( $P_{CN}$ ) [1]:

$$P_{CN} = \sigma u_{част-бульб} N \quad (8)$$

де  $\sigma$  – перетин зіткнення;  $u_{част-бульб}$  – відносна швидкість бульбашок та часток:

$$u_{част-бульб} = W_{висхід.поток} - u_{бульбашки} \quad (9)$$

$N$  – кількість бульбашок.

Найбільший перетин, де всі частки зіткнуться з повітряною бульбашкою, називаються перетином зіткнення:

$$\sigma = \pi R_{бульбашки}^2 (1 + \delta)^2 E \quad (10)$$

де  $R_{бульбашки}$  – радіус бульбашки, мкм;  $\delta$  – відношення радіусу твердої частки до радіусу бульбашки. Визначається:

$$\delta = \frac{r_{частка}}{R_{бульбашки}} \quad (11)$$

$E$  – коефіцієнт захоплення. Він визначає відношення числа часток, що досягають бульбашки, до числа часток, які потрапили б на поверхню бульбашки, якби вони рухалися прямолінійно, а не по лініях струму [1, 9].

$$E = \frac{\sigma}{S} = \frac{\pi l^2}{\pi (R_{бульбашки} + r_{частки})^2} = \frac{\pi l^2}{\pi R_{бульбашки}^2 (1 + \delta)^2} \quad (12)$$

На підставі теорії гідродинамічної взаємодії для часток розміром від 1 до 10 мкм можна застосовувати формули, які враховують вплив взаємодії зіткнення часток с бульбашками [1]:

$$E = \begin{cases} r_{частка}^{1,4} / R_{бульбашки}^2, Re < 1 \\ r_{частки}^{0,82}, Re \gg 1 \end{cases} \quad (13)$$

де  $r_{частки}$  – радіус частки, мкм;

Так як частки забруднення, які обумовлюють каламутність природної води, складають 1-2 мкм, а коефіцієнт  $Re < 1$ , то для знаходження коефіцієнта захоплення використовували формулу [1]:

$$E = (r_{частка})^{1,4} / (R_{бульбашки})^2 \quad (14)$$

В таблиці 1 приведені розрахунки константи флотаційного процесу для часток забруднень, які в основному знаходяться в поверхневій воді. Розмір повітряних бульбашок прийнято за літературними даними [12] і становлять для напірно-флотаційного процесу 15-30 мкм.

Швидкість висхідного потоку прийнято 6 мм/с. Це дозволить отримати з водоповітряної суміші стійкі бульбашки і зменшити ймовірність їх повторного розчинення у воді [13,14].

Початкову об'ємну концентрацію бульбашок в об'ємі флотаційної камери ( $b_0$ ) приймаємо рівною об'єму повітря, яке попередньо розчинилося у воді. Це складає 3-5% від об'єму оброблюваної води [15].

З розрахунків можна зробити висновки, що найбільша ймовірність зіткнення повітряних бульбашок буде з частками забруднення 2 мкм, що відповідає крупності часткам глини.

На рис. 1 показана залежність коефіцієнту захоплення ( $E$ ) від відношення розміру частки забруднення (діаметром 2 мкм) до розміру повітряної бульбашки.

Апроксимаційна залежність виглядає наступним чином:

$$E = \left( \frac{r_{частки}}{R_{бульбашки}} \right)^2 - 3 \cdot 10^{-15} \left( \frac{r_{частки}}{R_{бульбашки}} \right) \quad (15)$$

На рис. 2 показана залежність константи флотаційного процесу від розміру бульбашки.

Таблиця 1 - Визначення коефіцієнту флотаційного процесу для часток забруднення, які обумовлюють каламутність природної води

Найменування	Діаметр частки, мкм		Діаметр бульб, мкм	Коефіцієнт захоплення, E		Перетин зіткнення, мм <sup>2</sup>		Швидкість підйому бульбашки U <sub>1</sub> , м/с	Відносна швидкість руху часток та бульбашок	b <sub>0</sub>	Кількість бульбашок, 1/мм <sup>3</sup>	Константа флотаційного процесу K, с <sup>-1</sup>	
	від	до		від	до	від	до					від	до
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Коллоїдні частки	0,2	0,001	15	7,1·10 <sup>-4</sup>	4·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	8·10 <sup>-11</sup>	0,0001	5,9	0,05	28309	2·10 <sup>-2</sup>	1·10 <sup>-5</sup>
			20	4·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	8·10 <sup>-11</sup>	0,0002	5,8		11943	9·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-6</sup>
			25	2,6·10 <sup>-4</sup>	2·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	8·10 <sup>-11</sup>	0,0003	5,7		6115	4·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-6</sup>
			30	1,8·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	8·10 <sup>-11</sup>	0,0004	5,5		3539	2·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-6</sup>
			70	3,1·10 <sup>-6</sup>	2·10 <sup>-8</sup>	1·10 <sup>-7</sup>	8·10 <sup>-11</sup>	0,0026	3,4		279	1·10 <sup>-4</sup>	7·10 <sup>-8</sup>
Глина	2		15	0,0178		4,03·10 <sup>-6</sup>		0,0001	5,9		28309	0,671	
			20	0,01		3,8·10 <sup>-6</sup>		0,0002	5,8		11943	0,262	
			25	0,0064		3,63·10 <sup>-6</sup>		0,0003	5,7		6115	0,127	
			30	0,0044		3,57·10 <sup>-6</sup>		0,0005	5,5		3539	0,070	
			50	0,016		3,4·10 <sup>-6</sup>		0,0013	4,6		764	0,012	
			70	0,0008		3,32·10 <sup>-6</sup>		0,0027	3,3		279	0,003	
			80	0,0006		3,3·10 <sup>-6</sup>		0,0035	2,5		187	0,002	
			100	0,0004		3,27·10 <sup>-6</sup>		0,0054	0,6		96	0,0002	
			200	0,0001		3,2·10 <sup>-6</sup>		0,0217	15,7		12	0,001	
10 <sup>3</sup>	0,000004		3,15·10 <sup>-6</sup>		0,5434	537	0	0,00001					
Тонка глина	1	0,5	15	0,007		2,6·10 <sup>-3</sup>		0,0001	5,9		28309	0,23	
			20	0,004		1,4·10 <sup>-3</sup>		0,0002	5,8		11943	0,09	
			25	0,002		9,2·10 <sup>-4</sup>		0,0003	5,7		6115	0,04	
			30	0,001		6,4·10 <sup>-4</sup>		0,0004	5,5		3539	0,02	



Рис. 1. Залежність коефіцієнту захоплення (E) від відношення розміру частки забруднення (діаметром 2 мкм) до розміру повітряної бульбашки.

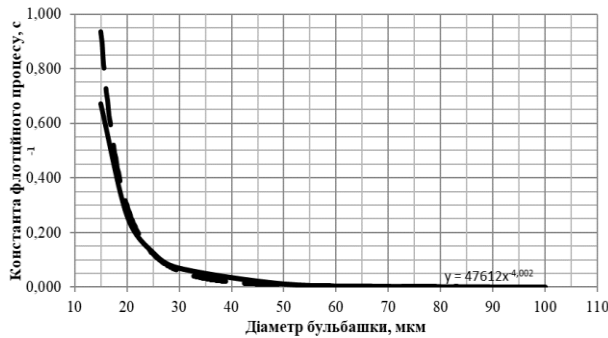


Рис. 2. Залежність константи флотаційного процесу від розміру бульбашки

З графіку видно, що при збільшенні діаметру бульбашки, константа флотаційного процесу стрімко зменшується. Ми вважаємо, що це значно може вплинути на подальший процес видалення забруднення. Тому, для ефективного видалення часток забруднення 1-2 мкм розмір бульбашок повинен складати від 15 до 40 мкм.

За допомогою програмного комплексу Microsoft Office Excel, визначаємо апроксимацію, залежність якої виглядає наступним чином:

$$K = 47612 \cdot (D_{\text{бульбашки}})^{-4.002} \quad (15)$$

### Висновки

1. Визначені числові значення коефіцієнту захоплення (E) та константи флотаційного процесу (K) для часток забруднення, які обумовлюють каламутність води поверхневого джерела.

Встановлені взаємозв'язки відношення розміру часток забруднення та розміру бульбашки повітря на коефіцієнт захоплення та константу флотаційного процесу, яка відіграє важливу роль в математичному моделюванні напірно-флотаційного

процесу очищення вод для господарсько-питного водопостачання.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Рубинштейн Ю. Б. Кинетика флотации [Текст] / Ю.Б. Рубинштейн, Ю.А. Филлипов. – М.: Недра, 1980. – 375 с.
2. Дерягин Б.В., Духин С.С., Рулев Н.Н. Микрофлотация: Водоочистка, обогащение. – М.:Химия, 1986. – 112 с.
3. Богданов О.С. Теория и технология флотации руд [Текст] / О.С. Богданов, И.И. Максимов, А.К. Поднек, Н.А. Янис. – М.: Недра, 1990 – 367 с.
4. Ясюкевич С.М. Обогащение руд [Текст]/ С.М. Ясюкевич. – М.: Государственное научно-техническое издательство литература по черной и цветной металлургии, 1953. – 515 с.
5. Лихачев Н.И. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Под общ. ред. В.Н. Самохина. – 2-е изд. [Текст]/ Н.И. Лихачев, И.И. Ларин, С.А. Хаскин и др. – М.: Стройиздат, 1981. – 640 с.
6. Кофман В.Я. Напорная флотация в водоподготовке (обзор зарубежных изданий) / В.Я. Кофман [Текст]// Научно-технический и производственный журнал "Водоснабжение и санитарная техника" ("ВСТ"). – М.: ООО «Издательство ВСТ», 2013. - №5. – С.44-48.
7. Богданов О.С. Физико-химические основы теории флотации [Текст]/ О.С. Богданов, А.М. Гольман, И.А. Каковский, В.И. Классен, В.И, Мелик-Гайказян и др. – М.: Наука, 1983. – 246 с.
8. Алексеева А.С. Многостадийная модель ионной флотации [Электронный ресурс]/ А.С. Алексеева, Б.С. Ксенофонов/ Химия и биология: электрон. научн. журн. -2015. - №6(14). Режим доступа: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/2184> - 01.11.2018 г. – Загл. с экрана.
9. Сироватський О.А. Метод очистки малокаламутних кольорових вод і методика проведення досліджень [Текст] / 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.
10. Сироватський О.А. Теоретичні аспекти напірної флотації малокаламутних кольорових вод [Текст] / О.А. Сироватський, О.Г.

- Гайдучок // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – № 2 (84). – С. 296-299.
11. Эпоян С. Моделирование процесса флотационной очистки маломутных цветных вод / С. Эпоян, А. Сыроватский, А. Гайдучок [Текст] // MOTROL// Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin-Rzeszow, 2016.- Volume 18, №6.- P.11-18.
  12. Белоглазов И.Н. Уравнение кинетики флотационного процесса [Текст] / И.Н. Белоглазов // Записки горного института. – Санкт-Петербург, 2008. – Т. 177. – С.129-132.
  13. Минин Д.В. Экспериментальный метод определения эффективности флотационной очистки природных вод [Текст]/ Д.В. Минин // Вестник МГСУ. – М., 2009. - №3. – С.136-139.
  14. Kwak D.-H. Rise velocity verification of bubble-floc agglomerates using population balance in the DAF process [Текст] / D.-H. Kwak, H.-J. Jung, S.-B. Kwon, E.-J. Lee, C.-H. Lee, S.-J. Yoo // Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA. - London: IWA Publishing, 2009. – Volume 58. – Issue 2. - P. 85 – 94.
  15. Moruzzi R.B. Characterization of micro-bubble size distribution and flow configuration in DAF contact zone by a non-intrusive image analysis system and tracer tests / R.B. Moruzzi, M.A. Reali [Текст] // Water Science and Technology. - London: IWA Publishing, 2010. – Volume 61. – Issue 1. - P. 253 – 262.

**Karahiaur A.S., Syrovatsky O.A., Titov A.A., Haiduchok O.G. DETERMINING CONS-**

**TANTS FLOTATION PROCESS FOR PARTICLES WHICH CAUSE TURBIDITY NATURAL WATER.** The issues of determining the numerical values of the capture coefficient and constants of the flotation process for particles of pollution that cause turbidity of natural water are considered. The dependences of the size of the particles of pollution and the size of the bubble on the constant of the flotation process are shown. The obtained numerical values allow to carry out mathematical modeling of the pressure-flotation process of cleaning low-natural natural waters for drinking water supply.

**Keywords:** dissolved air flotation, flotation rate, turbidity, particles of pollution, water treatment.

**Карагяур А.С., Сыроватский А.А., Титов А.А., Гайдучок А.Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТЫ ФЛОТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ЧАСТИЦ, КОТОРЫЕ ОБУСЛАВЛИВАЮТ МУТНОСТЬ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ.** Рассмотрены вопросы определения числовых значений коэффициента захвата и константы флотационного процесса для частиц загрязнения, которые обуславливают мутность природной воды. Показаны зависимости размера частиц загрязнения и размера пузырька на константу флотационного процесса. Полученные числовые значения позволяют провести математическое моделирование напорно-флотационного процесса очистки малокаламутных природных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

**Ключевые слова:** напорная флотация, константа флотационного процесса, мутность, частицы загрязнения, очистка природной воды.