

## ЗАЛЕЖНІСТЬ ШВИДКОСТІ ЗГУЩЕННЯ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ СУСПЕНЗІЇ ВІД ВЛАСТИВОСТЕЙ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ

<sup>1</sup>А.М.Касімов, <sup>2</sup>О.А.Атаманюк, <sup>3</sup>О.М.Назаренко

<sup>1</sup>УКРНІЕП, м. Харків, 61166, вул. Бакуліна, 6, тел. (057) 7020737,  
E-mail: ecolab25@niep.kharkov.ua

<sup>2</sup>ВАТ «Меткомбінат «Запоріжсталь», м. Запоріжжя, 69008, Південне шосе, 72,  
тел. (061) 2182593, E-mail: alex-ataman@yandex.ru

<sup>3</sup>ЗДА, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226. 8(061) 2238340,  
E-mail: alexnazar75@yandex.ru

*Розглядається процес згущування суспензій як рух двофазного потоку. Визначено залежності щільності потоку дисперсної фази і швидкості її осадження від концентрації за різних значень відношення щільності дисперсної фази і середовища. Теоретичні розрахунки підтверджені експериментально.*

*Рассматривается процесс сгущения суспензий как движение двухфазного потока. Определены зависимости плотности потока дисперсной фазы и скорости ее осаждения от концентрации при различных значениях соотношения плотностей дисперсной фазы и среды. Теоретические расчеты подтверждены экспериментально.*

*The process of condensing of suspensions as the motion of a diphasic stream is considered in the article. Dependences of a dispersible phase density and speed of its sediment depending on its concentration at different relation values of a dispersible phase density and environment are defined. Theoretical calculations are confirmed experimentally.*

Перероблення нафтопродуктів призводить до утворення значної кількості стічних вод, концентрації забруднювачів в яких повинні відповідати діючим екологічним нормативам. Це визначає актуальність проведених досліджень.

Одним із основних елементів систем зворотного водопостачання є споруди для очищення стічних вод. Вони повинні забезпечити ефективне видалення завислих часток, а також створювати необхідні умови для проходження і завершення різноманітних хімічних реакцій. Це зумовлює підвищення стабільності води, що дуже суттєво для забезпечення зворотного водопостачання без скидання стічних вод у водоймища. Ці вимоги закладені в основу розробки нових апаратів і споруд для очищення стічних вод.

На початку ХХ століття у колоїдну хімію ввійшли ідеї й методи фізики й фізичної хімії. Так почався етап фундаментальних відкриттів: встановлено гетерогенну природу колоїдних розчинів; відкрито седиментаційно-дифузійну рівновагу в суспензіях і емульсіях; розроблено метод визначення розмірів колоїдних часток і макромолекул за допомогою ультрацентрифуг; створено кінетичну теорію адсорбції й будови адсорбційних шарів поверхнево-активних речовин. У комбінації з термодинамікою поверхневих явищ Гіббса ці роботи склали теоретичний фундамент колоїдної хімії.

Відтак (приблизно з 1925 по 1975 рр.) головні успіхи колоїдної хімії були досягнуті на перетині з іншими науками: фізикою твердого тіла й рідин, електрохімією, гідродинамікою, біохімією й споріднених технологічних дисци-

плін. Наведемо кілька яскравих прикладів: відкриття ефекту адсорбційного зниження міцності твердих тіл (П.А. Ребиндер) і розклинюючого тиску в тонких плівках (Б.В. Дерягін), вивчення будови сироваткових білків методами електрофоретичного й адсорбційного аналізу (А. Тизеліус). Найбільшим успіхом виявилось виведення у 1940-х роках теорії стійкості ліофобних колоїдів (Б.В. Дерягін, Л.Д. Ландау, Є. Фервей, Я. Овербек). Характерна риса цього етапу розвитку колоїдної хімії – розроблення наукових основ прикладної колоїдної хімії (П.А. Ребиндер, І.В. Петрянов-Соколов, Ф.Д. Овчаренко, М.П. Волярович та ін.). Отримані результати ефективно реалізовані в технологіях флотажі, поліграфії, у виробництві будівельних і конструкторських матеріалів тощо.

Колоїдна хімія – наука динамічна, розвиток її інтенсивно триває, особливо в частині практичного додатка її досягнень для вирішення багатьох технологічних і екологічних проблем [1].

До 1965 р. у літературі практично були відсутні відомості про флокуляційне перемішування як засіб для інтенсифікації процесу очищення стічних вод і методику проведення досліджень. Як з'ясувалося пізніше, приблизно в цей час декілька груп дослідників незалежно один від одного (Вейцер, Аргаман, Кауфман) зробили серйозні спроби кількісної оцінки впливу флокуляційного перемішування для різних категорій стічних вод. Пантелятом Г.С. виконано комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на визначення оптимальних умов флокуляційного перемішування. Він запропонував схильність суспензії

до флокуляції оцінювати за величиною константи коагуляції  $K$ , умовно поділивши всю сукупність часток на дрібні і великі (флоккули) [2].

Яковлев С.В. розглядає процеси згущування і ущільнення суспензій і звертає увагу на первинні розміри часток, вплив їх розподілу за розмірами безпосередньо на щільність осаду. Побічно розмір часток спричинює значний вплив на щільність осадів завдяки здатності до агрегації часток малого розміру, що володіють збільшеним співвідношенням поверхні до об'єму. Це можна пояснити міцністю структури осаду, величиною електрокінетичного потенціалу, співвідношенням видів вологи дисперсної фази тощо [3].

Розглянуті авторами питання згущування суспензій базувались на ряді емпіричних співвідношень, які не розкривають повної фізичної суті процесів, що відбуваються при згущенні. Тому з'явилась необхідність розглянути процес згущення суспензій загалом з метою визначення основних властивостей цих процесів, здебільшого фільтраційних. Цьому напрямку і присвячено поданий нижче матеріал.

У наш час виконано комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на пошук оптимальних умов флокуляційного змішування.

Процес згущування суспензій можна розглянути із загальних позицій дослідження руху двофазних потоків. Рівняння руху двовимірного нестационарного двофазного потоку за відсутності тепло- і масообміну може бути записане у вигляді:

$$\rho(1-\alpha)\left[\frac{dU}{dt} + u\frac{dU}{dz}\right] + \rho_g\alpha\left[\frac{dU_g}{dt} + u_g\frac{dU_g}{dz}\right] = -g[(1-\alpha)\rho + \alpha\rho_g] - \frac{dP}{dz} - \frac{d\tau}{dz}. \quad (1)$$

Величина  $\alpha$  визначає частку дисперсної фази в середовищі-носії. При  $\alpha=0$  рівняння (1) збігається із звичайним рівнянням руху матеріального потоку.

Рівняння нерозривності для середовища-носія і дисперсної фази, що рівномірно розподіляється за даним обсягом суспензії, запишеться у вигляді:

$$\frac{d}{dt}[(1-\alpha)\rho] + \frac{d}{dz}[(1-\alpha)\rho U] = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(\alpha\rho_g) + \frac{d}{dz}(\alpha\rho_g U_g), \quad (3)$$

де:  $\rho$  та  $\rho_d$  – густина середовища-носія, і дисперсної фази;

$U$  та  $U_g$  – швидкості руху середовища-носія, і дисперсної фази;

$\tau$  та  $z$  – координати часу і довжини відповідно;

$P$  – тиск.

Прийнявши, що в'язкість рідини у разі взаємодії з дисперсною фазою повністю характеризується силою гідравлічного опору, перепишемо систему рівнянь (4-6) для стаціонарного процесу згущування у вигляді:

$$\frac{dP}{dz} + g[(1-\alpha)\rho + \alpha\rho_g] = 0, \quad (4)$$

$$3\pi\mu_0 d(U - U_g) = \frac{1}{6}\pi d^3 \left[ (\rho_g - \rho)g + \frac{dP}{dz} \right] f(\alpha), \quad (5)$$

де  $\mu = \mu_0 [f(\alpha)]^{-1}$  – в'язкість двофазного середовища, пов'язана з дійсною в'язкістю  $\mu_0$ .

Спільний розв'язок системи рівнянь (4-5) дає змогу виключити функцію тиску і отримати вираз:

$$U - U_g = \frac{d^2 g (\rho_g - \rho) (1 - \alpha)}{18 \mu_0} f(\alpha) - \frac{d^2 g (1 - \alpha) \rho}{18 \mu_0} f(\alpha). \quad (6)$$

У формулі (6) перший член правої частини містить швидкість вільного падіння твердої сферичної частинки  $U_0$ . Скористаємося найбільш поширеною формулою, що отримала експериментальне підтвердження в широкому діапазоні зміни концентрації твердої фази [4-6]:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^{2,5}, \quad (7)$$

крім того, середня об'ємна швидкість двофазного потоку може бути описана виразом

$$U_{cp} = (1 - \alpha) U + \alpha U_d. \quad (8)$$

Помноживши вираз (6) на  $(1 - \alpha)$  і використовуючи отриману залежність спільно з виразом (8), виключимо з розгляду швидкість  $U$  середовища-носія. Після відповідних перетворень отримаємо:

$$-U_g = U_0 (1 - \alpha)^{4,5} - \frac{g d^2 (1 - \alpha)^{4,5} \rho}{18 \mu_0} - U_{cp}. \quad (9)$$

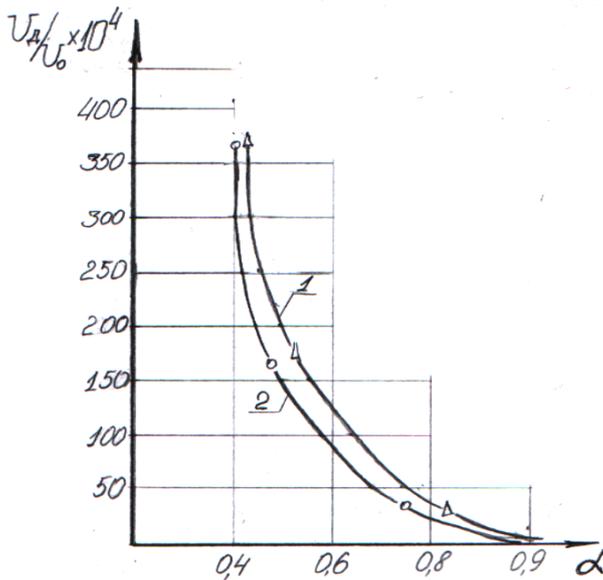
У процесі згущування суспензій осадження твердої фази відбувається з витісненням рідини, тобто середня об'ємна швидкість середовища дорівнюватиме нулеві (мінус перед  $U_g$  вказує на спрямування вектора швидкості осадження вниз).

На рис. 1 зображено залежність відносної швидкості  $U_g/U_0$  від концентрації твердої фази  $\alpha$  для різних співвідношень щільності твердої і рідкої фаз.

За нестационарного руху двофазного потоку із врахуванням викладених вище припущень рівняння (1) і (5) (з врахуванням рівняння руху окремої частки відповідно до закону Стокса) можна представити у вигляді [4-6]:

$$\rho(1-\alpha)\frac{dU}{dt} + \rho_g\alpha\frac{dU_g}{dt} = -g[(1-\alpha)\rho + \alpha\rho_g] - \frac{dP}{dz}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{6}\pi d^3 \rho \frac{dU_g}{dt} = 3\pi d \mu (U - U_g) - \frac{1}{6}\pi d^3 (\rho_g - \rho)g - \frac{1}{6}\pi d^3 \frac{dP}{dz}. \quad (11)$$



1 – щільність твердої та рідкої фаз відповідно 3,6 г/дм<sup>3</sup> та 1,025 г/дм<sup>3</sup>;  
2 – те ж, відповідно 3,8 г/дм<sup>3</sup> та 1,04 г/дм<sup>3</sup>

**Рисунок 1 — Залежність відносної швидкості осадження твердої фази від концентрації**

Розглядаючи згущування суспензії як процес осадження в ній твердої фази, прийемо  $U_{cp} = 0$  і отримаємо:

$$\frac{dU_g}{dt} + SU_g - Q = 0, \quad (12)$$

де:

$$S = \frac{18\mu_0}{[\rho - \alpha(\rho_g + \rho)](1-\alpha)d^2};$$

$$Q = \frac{[(1-\alpha)\rho + \alpha\rho_g]g}{\rho - \alpha(\rho_g + \rho)}.$$

Отримаємо розв'язок рівняння (12) за початкових умов  $U_g = 0$  при  $t = 0$ :

$$U_g = \frac{gd^2[(1-\alpha)\rho + \alpha\rho_g](1-\alpha)^{2,5}}{18\mu_0} \times \left( 1 - \exp\left\{ -\frac{18\mu_0\tau}{d^2(1-\alpha)^{2,5}[\rho - \alpha(\rho_g + \rho)]} \right\} \right). \quad (13)$$

Як свідчить практика використання рівняння (13), основний вплив на швидкість осадження часток здійснює перегрупування агрегатів і флокул внаслідок згущування в обмежених умовах всієї осідаючої маси твердої фази. Тому, нехтуючи експоненціальним членом в рівнянні (13) як величиною, що в умовах експерименту прямує до нуля, визначимо функціональну залежність величини  $\alpha$  від часу  $\tau$  [5-7].

Для цього використовуємо експериментальні залежності швидкостей осідання часток від часу згущування (рис. 3). Після визначення за методом вирівнювання залежність  $U_g = f(\tau)$  [4-6] набуде вигляду:

$$U_g = \alpha\tau^b e^{c\tau}. \quad (14)$$

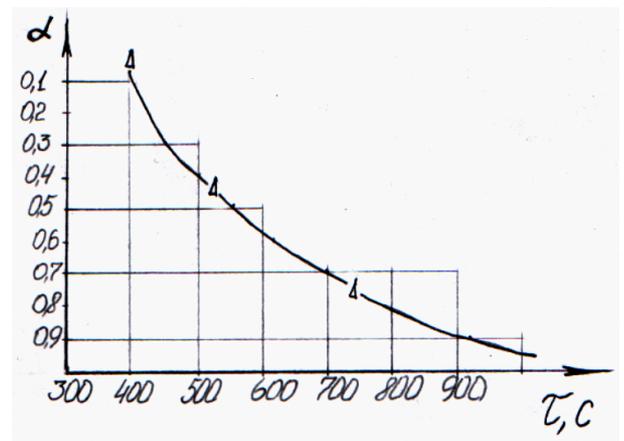
З рівняння (14) за методом неповних квадратів одержимо значення коефіцієнтів:

$$\alpha = 0,65842; b = 0,515; \tau = -0,011$$

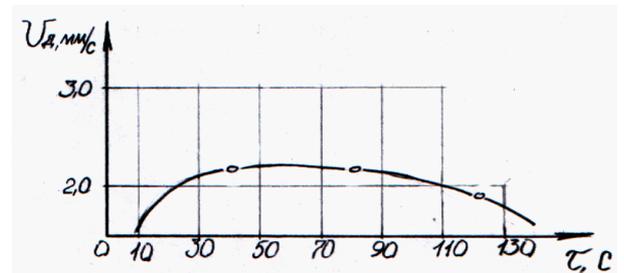
Далі для визначення зміни значень  $\alpha$  від часу згущування об'єднаємо рівняння (13) і (14):

$$\alpha\tau^b e^{c\tau} = \frac{gd^2[(1-\alpha)\rho + \alpha\rho_g](1-\alpha)^{2,5}}{18\mu_0}. \quad (15)$$

Розрахункові значення зміни концентрації твердої фази від часу згущування  $\alpha = f(\tau)$  зображені на рис. 2. Для умов експерименту за раніше заданих параметрів (рис. 3). В цьому випадку відповідність, кореляція розрахункових і експериментальних підтверджується повністю [7-8].



**Рисунок 2 — Зміна концентрації твердої фази у часі**



**Рисунок 3 — Зміна швидкості осадження твердих частинок у часі**

У процесі осадження твердої фази в суспензії на останню діють сили тиску стовпчика твердої фази, які визначають масові сили, пропорційні до координати.

Вторинні потоки витіснення рідини створюють гідродинамічний опір, що залежить за інших умов від швидкості руху часток. У зв'язку з нестационарністю процесу осадження розглядаються інерційні сили, які визначаються величинами прискорень. Рівняння руху можна записати у вигляді

$$f_1(x,t)\frac{d^2x}{dt^2} + f_2(x,t)\frac{dx}{dt} + f_3(x,t) = 0, \quad (16)$$

де:  $x$  – координата точки, в якій розглядається процес.

Функції  $f_i = (x, t)$  в рівнянні (16) визначають масові щільності твердого ( $\gamma_T$ ) та рідкого ( $\gamma_p$ ), еквівалентним або характеристичним діаметром часток ( $d$ ) і густини рідини ( $\rho$ ). Всі величини, крім ( $\gamma_p$ ), змінюються у часі. Із вимог дотримання розмірності в кожному із членів рівняння (16) визначаємо функцію та переходимо до безрозмірної системи одиниць згідно з правилом

$$x = x_1 H \quad \text{та} \quad t = t_1 \tau, \quad (17)$$

де:  $H$  – висота висвітленого стовпчика рідини (кінцева);

$\tau$  – час згущення.

Тоді рівняння (16) можна переписати у вигляді:

$$\frac{d^2 x}{dt_1^2} + \frac{1-2\alpha}{t_1} \frac{dx}{dt_1} + b^2 x = 0, \quad (18)$$

де:

$$\alpha = \frac{1}{2}(1-\omega)st \frac{\gamma_p}{\gamma_T}; \quad st = \frac{d\tau g}{\rho}; \quad b = \sqrt{\beta \frac{\gamma_p}{\gamma_T}},$$

тут:  $\beta, \omega$  – експериментальні константи.

Рівняння (18) є частковим випадком рівняння Бесселя при  $\alpha = 1$ . Його розв'язок можна записати так:

$$x_1 = t^\alpha \left[ C_1 I_p(bt_1) + C_2 N_p(bt_1) \right], \quad (19)$$

де:  $I_p$  – функція Бесселя порядку «Р»;

$N_p$  – функція Неймана порядку «Р».

Після відповідних перетворень рівняння (19) та переходу до початкових змінних отримаємо вираз для визначення висвітленого стовпчика рідини ( $\bar{X}$ ) і швидкості висвітлення у процесі згущення ( $U_D$ ):

$$\bar{X} = H \left( \frac{t}{\tau} \right)^p \left[ C_1 I_p \left( b \frac{t}{\tau} \right) + C_2 N_p \left( b \frac{t}{\tau} \right) \right]; \quad (20)$$

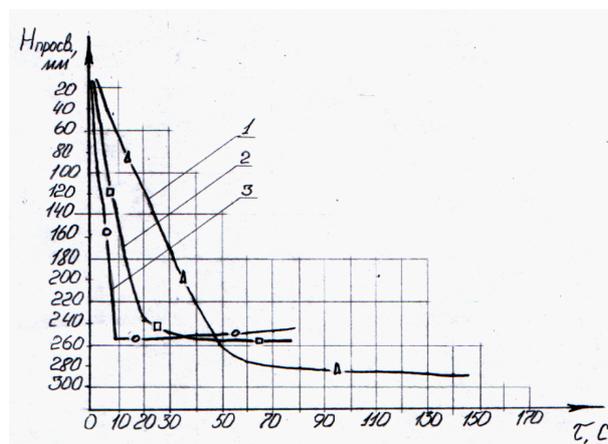
$$U_D = \frac{Hb}{\tau} \left( \frac{t}{\tau} \right)^{p-1} \left[ C_1 I_{p-1} \left( b \frac{t}{\tau} \right) + C_2 N_{p-1} \left( b \frac{t}{\tau} \right) \right]. \quad (21)$$

Константи інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  можуть бути знайдені із початкових вимог, проте, одержана система споріднених алгебраїчних рівнянь для свого вирішення потребує додаткових даних, пов'язаних з шуканими величинами за (17), отримати які дуже складно. Тому кількості  $\beta, \omega, C_1$  і  $C_2$  визначають експериментально для суспензії, де чітко визначені усі величини, які включають параметри  $\alpha$  і  $\beta$ .

На металургійному комбінаті «Запоріжсталь» проведено наукове дослідження процесів висвітлення стічних вод прокатних станів. Стічні води прокатних станів, забруднені окалиною і олією, висвітлюють на первинних відстійниках (ямах для окалини), розташованих безпосередньо на території розташування прокатних станів. Вторинне просвітлення і видалення олії здійснюють на горизонтальних відстійниках.

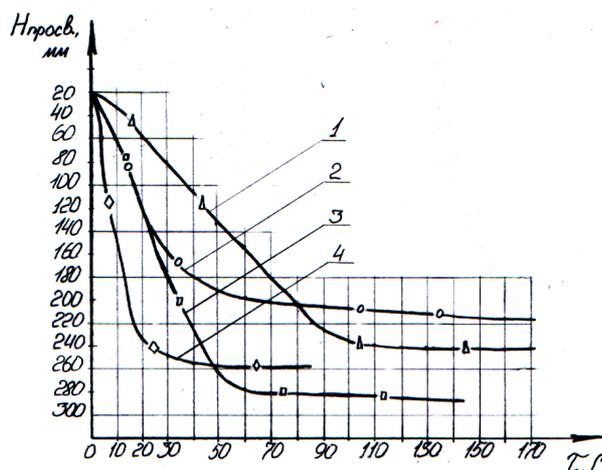
Маємо експериментальні криві  $X = f_1(t)$  та  $U_D = f_2(t)$  (рис. 4-6). Відображаючи інтегральні властивості розглянутих суспензій рівняннями (20), (21) можна вивчати механізм різноманітних перетворень, які відбуваються в суспензіях в результаті взаємодії її твердої та рідкої фаз в процесі згущування.

В результаті дослідження виявлено, що якість очищення стічних вод залежить від усереднення структури окалини у вторинних відстійниках. Необхідне усереднення структури окалини досягають регулюванням часу знаходження стічних вод у первинних відстійниках. Скорочення часу знаходження стічних вод прокатних станів у первинних відстійниках значно покращує якість висвітлення [9].



1 – 0,65 г/дм<sup>3</sup>; 2 – 1,3 г/дм<sup>3</sup>; 3 – 1,6 г/дм<sup>3</sup>.  
Фракція  $d=0,5$  мм.

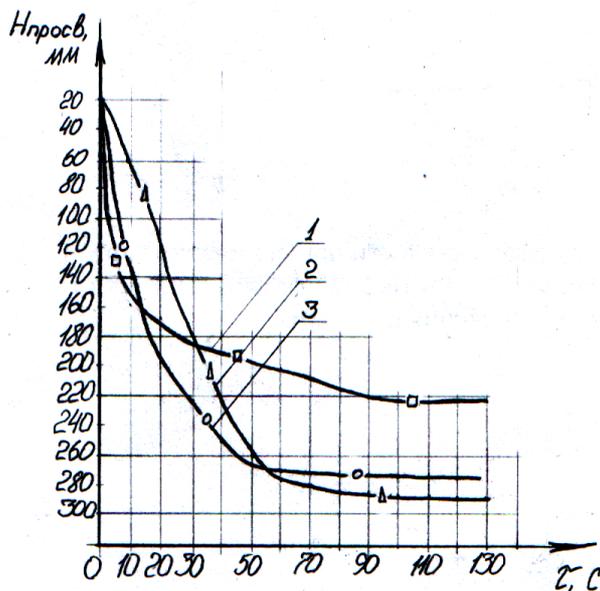
**Рисунок 4** — Зміна висоти просвітленого стовпчика рідини при осадженні часток окалини у часі залежно від концентрації твердої фази



1 – 0,39 г/дм<sup>3</sup>; 2 – 0,5 г/дм<sup>3</sup>; 3 – 0,78 г/дм<sup>3</sup>;  
4 – 0,91 г/дм<sup>3</sup>. Фракція  $d=0,3$  мм

**Рисунок 5** — Зміна висоти просвітленого стовпчика рідини при осадженні часток окалини у часі залежно від концентрації твердої фази

Література



1 – 0,39 г/дм<sup>3</sup>; 2 – 0,65 г/дм<sup>3</sup>; 3 – 0,78 г/дм<sup>3</sup>.  
Фракція d = 0,18 мм

**Рисунок 6** — Зміна висоти освітленого стовпчика рідини при осадженні часток окалини у часі залежно від концентрації твердої фази

Використовуючи різні значення часу  $t$  по  $f_1$  і  $f_2$  визначаємо значення  $X_i$  і  $U_D$ ; підставляємо в рівняння (5) та (6) і визначаємо зміну у часі величин  $d$ ,  $\gamma_T$ ,  $i\rho$ .

Запропонована модель процесу дозволяє виконати аналіз складних явищ, які відбуваються при згущенні суспензій та визначить загальні тенденції процесів згушення різних груп суспензій, для яких константи  $\beta$ ,  $\omega$ ,  $C_1$  і  $C_2$ ,  $d$ ,  $\gamma_T$ ,  $i\rho$  збігаються. Таким чином може бути виконана класифікація суспензій по їх основним властивостям.

1 Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии / Воюцкий С.С. – М.: Химия, 1976. – 512 с.

2 Пантелят Г.С. Системы водоснабжения металлургических агрегатов, исключаящих сброс отработанных вод в водоемы: автореф. дис. на соискание степени доктора наук: спец. 05.23.04 «Водоснабжение, канализация» / Г.С. Пантелят. – Москва, 1985. – 20 с.

3 Яковлев С.В. Обезвреживание осадков сточных вод металлургической промышленности / Яковлев С.В., Аксенов В.И., Волков Л.С. – М.: Стройиздат, 1984. – 97 с.

4 Минц М.Д. Теоретические основы технологии очистки воды / Минц М.Д. – М.: Наука, 1964. – 489 с.

5 Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1967. – 602 с. – (Изд. II).

6 Мурзин А.Р. Исследование механизма сгущения суспензий / А.Р. Мурзин, И.И. Таганов, И.С. Лавров – М: Наука, 1965. – 870 с.

7 К теории сгущения суспензий: материалы Всесоюз. научн.-техн. конф. [«Охрана окружающей среды и утилизация ценных отходов в металлургии»]. (Москва 12-14 окт. 1978 г.). – М., 1978. – С. 168-169.

8 Касимов А.М. Управление промышленными отходами./ Касимов Александр Меджитович. – Х. Тасис, 2000. – 308 с. – (Технологии обезвреживания и утилизации промышленных отходов; Кн.2)

9 Пат. 52419 А Україна, МПК 7 C02F1/52. Спосіб просвітлення стічних вод прокатного виробництва / Сидоренко О.П., Ликов О.А., Атаманюк О.А., Коваленко В.Ю.; заявник і патентовласник Відкрите акціонерне товариство «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь». – №2002053872; заявл. 11.05.2002; друк. 16.12.2002, Бюл. №12.

Стаття поступила в редакційну колегію  
19.03.09

Рекомендована до друку професором  
Я. М. Семчуком