

УДК 628.33:532.1

© Н.Г. Степова<sup>1</sup>, канд. техн. наук;  
Ю.І. Калугін<sup>1</sup>, канд. фіз-мат. наук;  
О.М. Кушка<sup>2</sup>, доцент, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ;

<sup>2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

## **МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ОСАДУ ОЧИСНИХ СПОРУД НА ФІЛЬТРПРЕСІ**

*Показана актуальність проблеми утилізації осаду водопровідних і каналізаційних очисних споруд в Україні. Обґрунтована ефективність його механічного зневоднення та наведені теоретичні передумови, які лежать в основі цього процесу. Складена комп'ютерна програма для розрахунку основних технологічних параметрів зневоднення осаду на фільтр-пресі, робота якої проілюстрована прикладом.*

**Ключові слова:** зневоднення осаду, моделювання, комп'ютерна програма, фільтрпрес.

### **Вступ**

У липні 2010 року Генеральна асамблея ООН визнала доступ до чистої води та каналізації одним з прав людини [1, 2]. А це означає якісну очистку води, включаючи всі пов'язані з цим процеси.

В Україні 56% населення користується централізованими системами водопостачання, до яких вода надходить з поверхневих джерел [3]. Така вода містить значну кількість завислих речовин, для вилучення яких використовуються реагенти. Найбільш уживаними в нашій країні є сульфат алюмінію і сульфат або хлорид тривалентного заліза [4]. Введення реагенту ініціює процес коагуляції, в результаті чого завислі речовини злипаються, збільшуються і продукують здатні до осідання частки, які в процесі седиментації утворюють осад.

Прийнявши 200 л водоспоживання на одну особу на добу, концентрацію завислих речовин після обробки реагентом 250 мг/л, і врахувавши кількість населення, яка користується очищеною водою з поверхневих джерел, можна приблизно оцінити масу осаду, яка утворюється щодоби в Україні – це близько 1300 т по сухій речовині. З урахуванням того, що даний тип осаду має вологість 99% і густину, близьку до густини води, отримуємо, що орієнтовно в Україні на водопровідних очисних спорудах продукується 130 000 м<sup>3</sup> осаду на добу. Слід зауважити, що проблема осаду характерна не лише для України, а є актуальною, в більших чи менших масштабах, для всього світу. Крім того, велика кількість осаду вологістю 90–99% (90% після первинних відстійників і 99% після вторинних) утворюється на

каналізаційних очисних станціях. В перерахунку на суху речовину це становить в середньому 150 г осаду після первинних відстійників і 80 г – після вторинних на кожний кубометр стічних вод, що надходять на очищення [5].

Скидання осаду водопровідних очисних споруд до річок (існуюча на багатьох українських станціях водопідготовки практика) або накопичення осаду каналізаційних очисних споруд на мулових майданчиках негативно впливає на довкілля. Запобігти цьому допомагає відповідна обробка осаду, і першим процесом тут є механічне зневоднення [5, 6].

## **Матеріали та методи**

### **Визначення величини зменшення об'єму осаду**

Зневоднення осаду водопровідних і каналізаційних очисних споруд дозволяє суттєво зекономити кошти на його транспортування і утилізацію або ліквідацію завдяки суттєвому (у разі) зменшенню об'ємів осаду навіть при незначній (на кілька відсотків) зміні вологості.

Наочно це можна проілюструвати за допомогою графіка, наведеного на рис. 1, на якому показана зміна об'єму осаду в залежності від його вологості. На осі абсцис відкладено об'ємну вологість у відсотках, а на осі ординат – відносний об'єм осаду, приведений до безрозмірного вигляду. Під відносним об'ємом осаду розуміється відношення загального об'єму осаду  $V_{oc}$  до об'єму його твердої фази  $V_{mf}$ :

$$\bar{V} = \frac{V_{oc}}{V_{mf}}; \quad (1)$$

Об'ємна вологість  $W$  розраховувалась як об'єм води в осаді  $V_w$ , виражений у відсотках до його початкового об'єму  $V_{oc}$ :

$$W = \frac{V_w}{V_{oc}} \cdot 100\% = \frac{V_w}{V_w + V_{mf}} \cdot 100\%; \quad (2)$$

Знаючи, що  $V_{oc} = V_w + V_{mf}$ , і використовуючи вираз (2), можна знайти, у скільки разів зменшується об'єм осаду при втраті ним вологи:

$$n = \frac{V_{ocn}}{V_{ock}} = \frac{100\% - W_k}{100\% - W_n} \quad (3)$$

Тут  $n$  – коефіцієнт зменшення об'єму осаду;

$V_{ocn}$  – початковий об'єм осаду, м<sup>3</sup>;

$V_{ock}$  – кінцевий об'єм осаду (об'єм осаду після зневоднення), м<sup>3</sup>;

$W_n$  – початкова об'ємна вологість осаду, %;

$W_k$  – кінцева об'ємна вологість осаду (об'ємна вологість осаду після зневоднення), %.

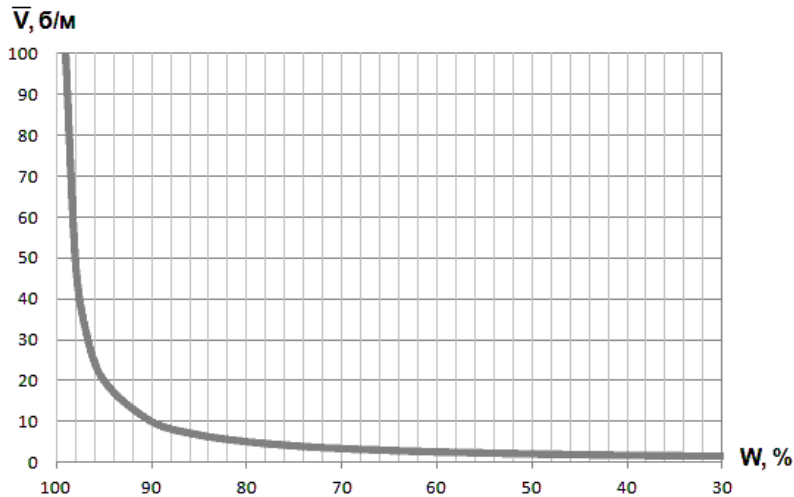


Рис. 1 – Зміна відносного об'єму осаду в залежності від вологості

Неважко підрахувати, що при зменшенні вологості навіть на дев'ять відсотків – з 99% до 90%, об'єм осаду зменшується у 10 разів:

$$n = \frac{100\% - 90\%}{100\% - 99\%} = 10$$

Досить часто в літературі (наприклад, [6]) використовується поняття вологості осаду по масі. У цьому випадку вираз (2) зміниться до наступного вигляду:

$$W_M = \frac{V_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}{V_{\text{в}} \rho_{\text{в}} + V_{\text{тп}} \rho_{\text{тп}}} \cdot 100\%; \quad (4)$$

Тут  $\rho_{\text{в}}$  – густина води,  $\rho_{\text{тп}}$  – густина твердої речовини.

Для розуміння порядку величини густини твердої фази в осаді очисних споруд наведемо кілька цифр. Так, густина твердої фази активного мулу (після біологічного очищення стічних вод) в середньому становить  $1250 \text{ кг/м}^3$  [5]. Густина твердої фази осаду станції водопідготовки після обробки води солями заліза –  $3000 \text{ кг/м}^3$  [7].

Сучасні споруди для механічного зневоднення осаду дозволяють зменшити його об'єм більше ніж у 20 разів [8]. Найбільш розповсюдженими установками на сьогодні є центрифуги, які ще називають відцентровими декантерами, і фільтрпреси.

Зазвичай осад після водопровідних очисних споруд зневоднюють до вологості 75–80% [6]. Такий показник вологості є обґрунтованим, перш за все, з економічної точки зору. За формулою (3) неважко підрахувати, що при зменшенні вологості з 99% до 75% об'єм осаду зменшиться у 25 разів, тоді як при зменшенні вологості з 75% до 25% об'єм осаду зменшиться лише у 3 рази.

На жаль, на сьогодні водопровідні та каналізаційні очисні споруди міста Києва, як і переважної більшості українських міст, не обладнані спорудами механічного зневоднення

осаду, хоча на деяких з них і проводилось експериментальне зневоднення на пересувних установках [8]. На рис. 2 наведена фотографія осаду вологістю 76% після його тестового зневоднення на Дніпровській водопровідній станції міста Києва. Як бачимо, консистенція механічно зневодненого осаду робить його придатним для транспортування за допомогою вантажівок, тоді як вихідний осад вологістю 99% є рідким і транспортувати його можна лише за допомогою трубопроводів.



*Рис. 2 – Осад вологістю 76% після зневоднення*

Виходячи з актуальності проблеми, було проведене математичне моделювання процесу механічного зневоднення осаду на фільтрпресі.

### ***Теоретичні основи процесу***

Спрощено схему роботи фільтрпреса можна представити так, як це зображено на рис. 3. Осад подається до фільтрувальної камери висотою  $H_0$  (див. рис. 3), що з одного боку обмежена мембраною, а з іншого поршнем, до якого прикладається надлишковий тиск  $\Delta P$ . Під дією тиску  $\Delta P$  вода, що міститься в осаді, фільтрується крізь мембрану, утворюючи фільтрат, а тверда фаза накопичується всередині фільтрувальної камери. Процес припиняється, коли внутрішній (осмотичний) тиск осаду сягає величини зовнішнього тиску  $\Delta P$  і поршень не в змозі рухатись далі. При цьому висота шару осаду зменшується від первісного значення  $H_0$  до кінцевого значення  $h$ .

Теоретичні основи процесів, що відбуваються при зневодненні осаду у фільтрпресі, та принципи математичного моделювання цієї споруди докладно описані у роботах [7, 9, 11].

Основою розуміння процесу фільтрування осаду під тиском є усвідомлення того факту, що окрім гідростатичного навантаження, яке є прямо пропорційним висоті шару осаду в камері фільтрпресу, існує ще внутрішній тиск структурованої системи, який при стабільних

умовах може розглядатись як осмотичний тиск [7, 10]. Сума цих двох видів зусиль становить той тиск, який треба подолати, прикладаючи до поршня зовнішнє зусилля, щоб процес зневоднення розпочався. При цьому частка гідростатичної та осмотичної складової в загальному тиску змінюється по висоті камери й залежно від часу фільтрування. Загальним підходом при моделюванні є встановлення залежності між тиском твердої фази і її концентрацією. Природа цього явища докладно описана в роботі [11], де тиск часток пояснюється через межу еластичності  $P_y(\phi)$ .

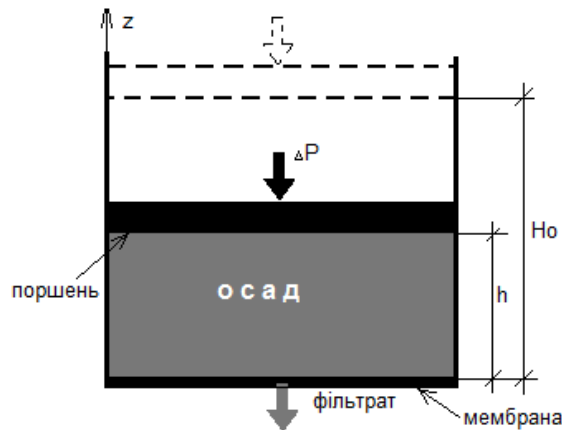


Рис. 3 – Схема роботи установки

В якості постулату Баскол і Уайт [11] прийняли, що структура, яка містить дуже велику кількість завислих часток (з концентрацією не менш, ніж 5 г/л [12]), може поводитись як тверде тіло об'ємної фракції  $\phi$  доти, поки зовнішнє зусилля не перевищить межі еластичності. При досягненні цієї межі відбувається руйнування структури й локальне збільшення об'ємної фракції. При цьому при моделюванні даного процесу приймається, що руйнування структури протікає дуже швидко в порівнянні з часом перебування всього процесу фільтрування, отже, зовнішній тиск у кожному елементарному об'ємі суспензії завжди тільки на нескінченно малу величину вище межі еластичності [11]. Процес закінчується, коли зовнішнього тиску поршня вже недостатньо, щоб перевищити межу еластичності осаду, обумовлену його коагулятивними властивостями.

З технологічної точки зору ми спостерігаємо за зміною  $h(t)$  і намагаємось визначити, як контроль над такими параметрами, як  $\Delta P$ ,  $X_0$  та  $H_0$  може вплинути на пропускну спроможність фільтрпреса.

Рівняння, що описують перебіг процесу фільтрування осаду в часі, наведені в роботах різних авторів, наприклад [7, 9, 11, 13], і можуть бути зведені до вигляду дифузійного рівняння, записаного для локальної об'ємної фракції твердої фази  $X$ :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(X) \frac{\partial X}{\partial z} - X \frac{dh}{dt} \right] \quad (5)$$

Тут  $X$  – об'ємна фракція твердої фази;

$dh/dt$  – швидкість руху поршня;

$D(X)$  – коефіцієнт дисперсії, який в роботі [9] пропонується визначати за такою формулою:

$$D(X) = \left(\frac{V_p}{\lambda}\right) \left[\frac{dP_y/dX}{r(X)}\right] (1-X)^2 \quad (6)$$

Тут  $V_p$  – середній об'єм однієї частинки;

$\lambda$  – коефіцієнт опору руху частинки;

$r(X)$  – коефіцієнт стисненого осідання;

$P_y$  – залежна від концентрації твердої фази межа еластичності осаду.

Коефіцієнт стисненого осідання  $r(X)$  входить до залежності для визначення середньої швидкості осідання часток  $u$  [11]:

$$u = \frac{u_0(1-X)}{r(X)} \quad (7)$$

Тут  $u_0$  – швидкість вільного осідання однієї частинки.

З іншого боку існує емпіричний підхід для визначення швидкості  $u$  [14, 15]:

$$u = u_0(1-X)^a, \text{ де } a \approx 4.5 - 6.5 \quad (8)$$

Прирівнявши рівняння (7) і (8), отримуємо вираз, який пов'язує коефіцієнт стисненого осідання з об'ємною фракцією твердої фази:

$$r(X) = \frac{u_0(1-X)}{u_0(1-X)^a} = (1-X)^{1-a} = (1-X)^{-b}, \quad (9)$$

де  $b \approx 3.5 - 5.5$ .

Багато авторів, наприклад [7, 9, 16], описують  $P_y$  наступною степеневою залежністю:

$$P_y = p_1 \left[ \left(\frac{X}{X_g}\right)^{p_2} - 1 \right] \quad (10)$$

Тут  $X_g$  – об'ємна фракція твердої фази у точці гелеутворення;  $p_1, p_2$  – емпіричні параметри.

З виразу (10) може бути обчислена похідна  $dP_y/dX$ :

$$\frac{dP_y}{dX} = \frac{p_1 p_2 X^{p_2-1}}{X_g^{p_2}} \quad (11)$$

Підставивши рівняння (9) і (11) у рівняння (6), отримаємо вираз для визначення коефіцієнту дисперсії  $D(X)$ :

$$D(X) = \left(\frac{V_p}{\lambda}\right) \left[\frac{p_1 p_2 X^{p_2-1}}{X_g^{p_2}}\right] (1-X)^{2+b} = d_1 X^{d_2} (1-X)^{d_3} \quad (12)$$

Тут

$$d_1 = \frac{V_p p_1 p_2}{\lambda X_g^{p_2}};$$

$$d_2 = p_2 - 1;$$

$$d_3 = 2 + b.$$

Наведені вирази для розрахунку коефіцієнтів  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  можуть використовуватись як орієнтир взаємозв'язку між різними параметрами, які мають для кожного окремого типу осаду визначатись експериментальним шляхом.

Максимальна об'ємна фракція твердої фази у фільтрпресі  $X_{inf}$  підраховується, виходячи з припущення, що процес зневоднення припиняється, коли внутрішній (осмотичний) тиск осаду сягає величини зовнішнього тиску  $\Delta P$  і поршень не може рухатись далі. З урахуванням рівняння (10) для визначення осмотичного тиску осаду отримуємо:

$$\Delta P = p_1 \left[ \left( \frac{X_{inf}}{X_g} \right)^{p_2} - 1 \right] \quad (13)$$

Звідси максимальна об'ємна фракція твердої фази:

$$X_{inf} = X_g \left( \frac{\Delta P}{p_1} + 1 \right)^{1/p_2} \quad (14)$$

## Результати та дискусія

На основі викладених вище рівнянь була сформульована крайова задача, що описує процес зневоднення осаду у камері фільтрпреса за відповідних граничних та початкових умов. Усі параметри за стандартними методиками були переведені до безрозмірного вигляду, після чого крайова задача вирішувалась за допомогою чисельних методів. Спочатку для цього скористались класичним методом Рунге-Кутти четвертого порядку з автоматичним вибором довжини кроку інтегрування, величина якого коливалась у межах від 0,000125 (на початку розрахунку) до 0,0000625 (у кінці розрахунку). Але у зв'язку з тим, що тривалість кожного окремого розрахунку за методом Рунге-Кутти становила близько 15 хвилин, програму було переписано із застосуванням модифікованого методу ітерацій, який дозволив на порядок прискорити час роботи програми.

Створена комп'ютерна програма дозволяє за заданими вихідними даними (початковий шар осаду, точка гелеутворення, початкова концентрація твердої фази, зовнішній тиск, осмотичний тиск та коефіцієнт дисперсії), які легко вводяться або коригуються користувачем завдяки зручному інтерфейсу, розраховувати у будь-який момент часу концентрацію твердої фази у різних точках фільтрувальної камери, питомі витрати фільтрату, його сукупний об'єм тощо [8, 17].

Як приклад на рис. 4 наведена зміна часу фільтрування осаду в залежності від початкової концентрації твердої фази в ньому. Розрахунки (використані для побудови графіка, наведеного на рис. 4) проводились при наступних вихідних даних:  $\Delta P = 1000$  кПа;  $H_0 = 0,015$  м;  $X_g = 0,007$ ;  $p_1 = 1,150$  Па;  $p_2 = 4,667$ ;  $d_1 = 0,00353$  м<sup>2</sup>/с;  $d_2 = 3,667$ ;  $d_3 = 35,104$ .

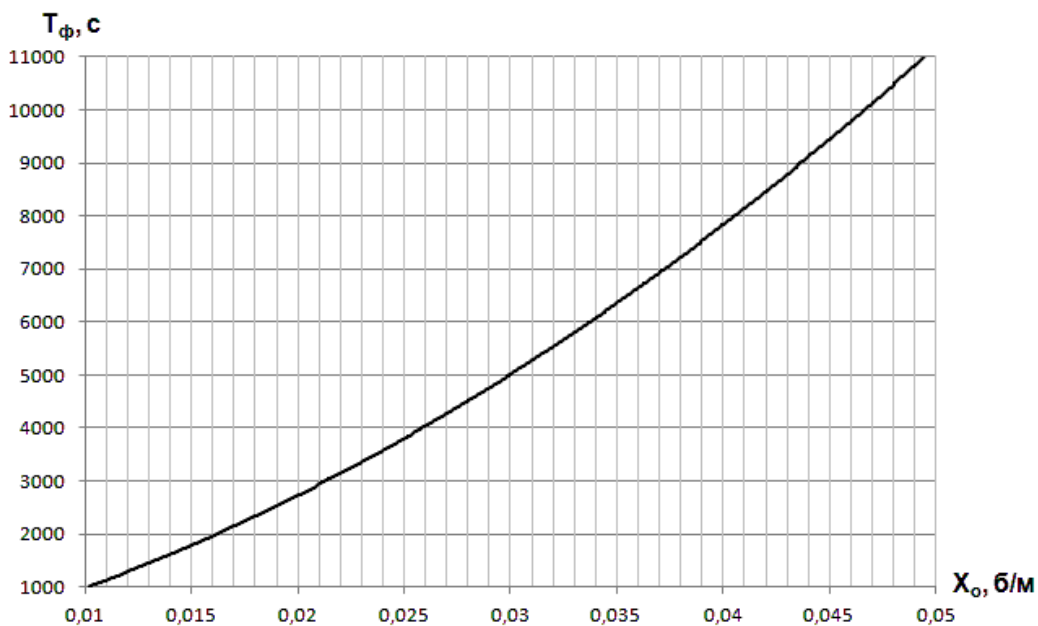


Рис. 4 – Залежність часу фільтрування від початкової концентрації твердої фази

## Висновки

1. Утилізація осаду водопровідних і каналізаційних очисних споруд в Україні залишається ще й досі гострою проблемою, яку, зважаючи на значні об'єми осаду та його негативний вплив на довкілля, необхідно якнайшвидше вирішувати.

2. Оскільки механічне зневоднення осаду, яке дозволяє за незначний проміжок часу знизити його об'єм у 20–25 разів, є міжнародною практикою розв'язання подібної проблеми, актуальності набуває задача прогнозування роботи споруд механічного зневоднення.

3. З цією метою на базі описаної у зарубіжній фаховій літературі математичної моделі сформульована і вирішена чисельними методами крайова задача роботи фільтрпреса.

4. Розроблено комп'ютерну програму зі зручним інтерфейсом, яка дозволяє легко вводити або змінювати вихідні дані, швидко проводити розрахунки і отримувати у графічному вигляді основні технологічні параметри роботи фільтрпреса.



**Список використаної літератури**

1. United Nations. Resolution 64/292 «The human right to water and sanitation» of 28 July 2010 / General Assembly of United Nations, 2010, 3 p.
2. Wagner B. Menschenrecht auf sauberes Trinkwasser / Beate Wagner // WWT Wasserwirtschaft Wassertechnik. – 2011. – № 3. – С. 6–7.
3. Загальнодержавна програма "Питна вода України" на 2006–2020 роки, затверджена Законом України від 3 березня 2005 р. № 2455-IV.
4. Запольський А.К. Фізико-хімічна теорія очищення води коагулюванням сульфатом алюмінію / А.К. Запольський // Вода і водоочисні технології. – 2012. – № 1. – С. 4–13.
5. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (Fourth Edition). Section 14. – Metcalf&Eddy Inc. – 2003. – pp. 1447–1631.
6. Технический справочник по обработке воды [Дегремон], пер. с фр., Санкт-Петербург: Новый журнал. – 2007. – 1696 с.
7. Numerical modeling of fixed-cavity plate-and-frame filtration: formulation, validation and optimization / A.D. Stickland, R.G. de Kretser, P.J. Scales [et al.] // Chem. Eng. Sci. – 2006. – № 61. – pp. 3818–3829.
8. Степова Н.Г. Проблеми зневоднення осаду водопровідних і каналізаційних очисних споруд та шляхи їх вирішення / Н.Г.Степова, Ю.І. Калугін, О.М. Кушка // Водопостачання та водовідведення. – 2012. – № 1. – С. 24– 29.
9. Landman K.A. Prediction filtration time and maximizing throughput in a pressure filter // K.A. Landmann, L.R. White / AIChE Journal. – 1997. – vol. 43(12). – pp. 3147–3160.
10. Степова Н.Г. Вплив фізико-хімічних властивостей осаду каналізаційних очисних споруд на його здатність до зневоднення / Н.Г. Степова // Екологічна безпека та природокористування. – 2011. – № 7. – С. 73– 81.
11. Buscall R. The Consolidation of Concentrated Suspensions // R. Buscall, L.R. White / J. Chem. Soc., Faraday Trans. – 1987. – vol. 83 (1). – pp. 873– 891.
12. Schumacher S. Leistungsbestimmende Prozesse in Nachklärbecken, (Abschnitt 3.3.5. Rheologie) / Sebastian Schumacher. – Hannover: Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, 2006. – 137 S. – (Bericht Nr. 73/2006).
13. Landman K.A. Pressure Filtration of Flocculated Suspensions // K.A. Landman, L.R. White, M. Eberl / AIChE Journal. – 1995. – vol. 41(7). – pp. 1687–1700.
14. Landman K.A. Determination of the Hindered Settling Factor for Flocculated Suspensions // K.A. Landmann, L.R. White / AIChE Journal. – 1992. – vol.38 (2). – pp. 184–192.
15. Landman K.A. Solid/liquid separation of flocculated suspension // K.A. Landmann, L.R. White / Advances in colloid and interface science. – 1994. – vol. 51. – pp. 175–246.
16. Landman K.A. Dewatering of flocculated suspensions by pressure filtration // K.A. Landmann, C. Sirakoff, L.R. White / American Institute of Physics, Phys.Fluids A. – 1991. – vol. 3(6). – pp. 1495–1509.

17. Степова Н.Г. Сучасні методи обробки осаду очисних споруд систем водопідготовки та водовідведення // Н.Г. Степова, О.М. Кушка, Ю.І. Калугін / Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2011. – № 15. – С. 71–77.

*Стаття надійшла до редакції 28.02.14 українською мовою*

© Н.Г. Степова, Ю.І. Калугін, А.Н. Кушка

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОСАДКА  
ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ФИЛЬТРПРЕССЕ**

*Показана актуальность проблемы утилизации осадка водопроводных и канализационных очистных сооружений в Украине. Обоснована эффективность его механического обезвоживания и приведены теоретические предпосылки, лежащие в основе данного процесса. Составлена компьютерная программа для расчета основных технологических параметров обезвоживания осадка на фильтрпрессе, работа которой проиллюстрирована примером.*

© N.G. Stepova, Y.I. Kalugin, O.M. Kushka

**SIMULATE MECHANICAL SLUDGE DEWATERING TREATMENT FACILITIES  
IN FILTER PRESS**

*The problem is brought up how urgent is for Ukraine to utilize the sediment in water and wastewater treatment plants. Efficiency of its mechanical dewatering is shown and theoretical background of this process is presented. A computer code has been written to calculate the main technological parameters of sludge dewatering in filter press, which work is illustrated by an example.*