

УДК 625.35:532.5

ВРАХУВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ КАНАЛІЗАЦІЙНОГО ВІДСТІЙНИКА ПРИ ЙОГО МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ

*Н.Г. Степова, канд. техн. наук
Ю.І. Калугін, канд. фіз.-мат. наук
(Інститут гідромеханіки НАН України)*

На базі математичної моделі вторинного відстійника, яка враховує зміну площі перерізу донної частини споруди по висоті, проведені розрахунки основних технологічних параметрів реального каналізаційного відстійника.

На базе математической модели вторичного отстойника, которая учитывает изменение площади сечения донной части отстойника по высоте, проведен расчет основных технологических параметров реального канализационного отстойника.

Based on the mathematical model of a secondary settler that takes into account the relationship between the cross-section of the unit bottom and its height, the calculation of the main technological parameters of a real sewage settler was carried out.

Вступ.

До суттєвих складових екологічного балансу будь-якої країни, поруч з повітрям, належить чиста вода, головним чинником дотримання якої в належному стані є попередження її забруднення, що безпосередньо пов'язане з якісним очищенням стічних вод.

Існуючі на сьогодні в Україні технології підготовки питної води не можуть забезпечити її якості на рівні Європейських стандартів та рекомендацій Всесвітньої організації охорони здоров'я. У питній воді після обробки залишається майже 30% загального органічного вуглецю [1].

Причому погіршення за останні роки якості питної води пов'язане не стільки з тим, що була недостатньо продумана техноло-

гічна схема станцій водоочищення, скільки з суттєвими змінами складу води джерел водопостачання за час, що минув після введення в дію очисних споруд.

Впливає на ситуацію і наявність в Україні великої кількості неканалізованих об'єктів. Це переважно житлові будинки індивідуального типу, утворювані якими стоки часто скидаються до необладнаних ям і в подальшому без будь-якого очищення фільтруються в ґрунт, забруднюючи підземні води сполуками азоту, фосфору та органікою. І така вода потім, надходячи до річок, озер, колодязів, використовується населенням як джерело питної води [1—3].

Вирішення проблеми — це якісна очистка побутових та промислових стічних вод. Найефективнішими, екологічно безпечними та найбільш розповсюдженими на сьогодні є методи біологічної очистки, де суб'єктом очищення води від органічних забруднень виступають мікроорганізми.

Головним фактором, що впливає на ефективність роботи очисних споруд є правильний їх попередній розрахунок, який відтворює реальну картину мікробіологічних та гідродинамічних процесів у спорудах, їх конструктивних (важливо на етапі будівництва) та технологічних (запуск та експлуатація споруд) параметрів, гарантує якісне очищення стічної води, в подальшому зниження витрат при отриманні води питної якості (на водоочисних спорудах) як з поверхневих, так і з підземних горизонтів. А в цілому поліпшує екологічну ситуацію, тому що кругообіг чистої води — основа екологічної безпеки.

У результаті очищення стічної води мікроорганізмами утворюються так звані пластівці активного мулу, які потрібно видалити з води, перш ніж скидати її до природної водойми. Функцію розділення мулово-водяної суміші на каналізаційній очисній станції виконує вторинний відстійник.

Матеріали та методи.

Метою цієї роботи було математичне моделювання процесів, що відбуваються у вторинному відстійнику з урахуванням його конструктивних особливостей.

Зазвичай дану споруду при моделюванні представляють у вигляді циліндру, об'єм якого умовно поділяється на кілька зон

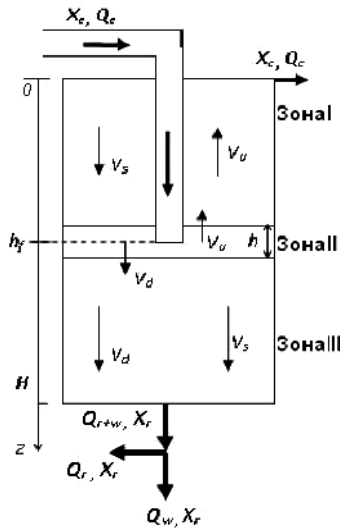


Рис. 1. Традиційна схема відстійника при його моделюванні.

(див. рис. 1) [4–7]. Це зона очищення (зона I, рис. 1), де перебуває вода з приблизно вихідною концентрацією завислих речовин; зона розбавлення (або зона живлення), куди подається мулово-водяна суміш після біореактора (зона II, рис. 1). З цієї зони пластівці мулу виносяться з висхідним потоком, що має швидкість V_u до верхньої зони та з низхідним потоком зі швидкістю V_d до нижньої зони, яка являє собою область стисненого осідання й ущільнення (зона III, рис. 1). Тут відбувається накопичення активного мулу, що осідає в процесі відстоювання. З цієї зони ущільнений осад з концентрацією X_r вилучається через мулопроводи. Частина вилученого мулу з витратою Q_r повертається назад до аеротенку. Це рециркуляційний або зворотний мул. Надлишковий мул з витратою Q_w спрямовується до блоку переробки осаду.

У багатьох роботах [4, 5, 8, 9] висота зони живлення h приймається такою, що дорівнює нулю (див. рис. 1). Вважається, що мулово-водяна суміш, надходячи до споруди на глибині h_f , миттєво змішується з рідиною у відстійнику по всій площі його перерізу. Для математичного описання цього явища до рівнянь масового балансу вводиться функція Дірака [5, 8].

Оскільки реальний вторинний відстійник зазвичай має конусоподібну форму дна, площа перерізу якої змінюється по висоті споруди, цей факт, на думку авторів, слід враховувати й при математичному моделюванні. На рис. 2 наведена схема відстійника, яку прийнято за основу при складенні рівнянь матеріального балансу.

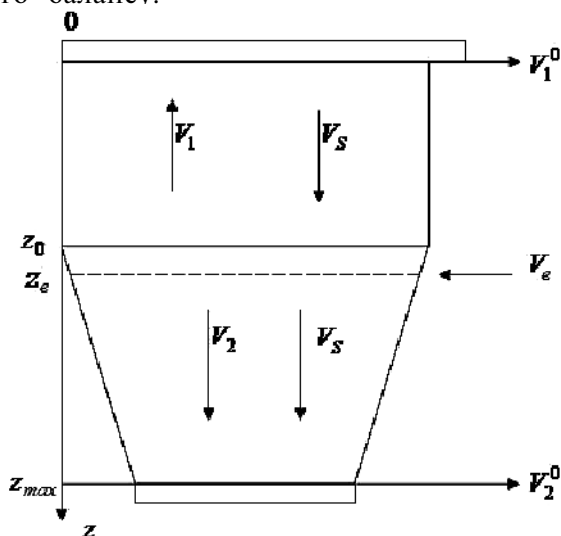


Рис. 2. Розрахункова схема відстійника, прийнята в даній роботі.

Як показано на рисунку, вторинний відстійник розглядається як ємність, що складається з двох блоків: циліндричного та конусоподібного. Через зону живлення ($z = z_e$) до нього надходить витрата рідини Q_e . При цьому виконується рівність: ($Q_e = Q_1 + Q_2$), тобто витрата мулово-водяної суміші, що надходить до відстійника, дорівнює сумі витрат очищеної води та мулу, що вилучаються із споруди відповідно через його верхню та нижню частини (див. рис. 2).

Рівняння масового балансу буде включати член, що враховує гідравлічний потік VX , а також член, який враховує введення мулово-водяної суміші. Крім того, до рівняння введений дифузійний член (просторова похідна другого порядку), як це пропонується у роботі [10]:

$$A(z) \frac{\partial X}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} [(V(z) + V_s(X))A(z)X] + \\ + D \frac{\partial (A(z)X)^2}{\partial z^2} + A_e V_e X_e \delta(z - z_e) \quad (1)$$

де X_e — концентрація завислих речовин у мулово-водяній суміші, d — дельта-функція Дірака; z_e — просторова координата місця вприскування; V — гідравлічна швидкість потоку, м/год; D — коефіцієнт дисперсії, м²/год; $A(z)$ — площа поперечного перерізу відстійника, м².

Закон, що описує залежність швидкості осідання від концентрації, задамо у вигляді:

$$V_s(X) = V_0 e^{-nX} - V_a e^{-n_a X} \quad (2)$$

Природно, що лінійне накладення двох потоків (седиментаційного та гідравлічного) є ідеалізацією реальних процесів і вводиться для того, щоб утримати складність моделі на прийнятному рівні.

Для випадку конусоподібної форми нижньої частини відстійника маємо залежність площі поперечного перерізу відстійника $A(z)$ від вертикальної координати z . Залежність для $A(z)$ можна легко визначити, якщо знати розміри відстійника та місце розташування зони живлення. Нехай $z = z_0$ — межа розділу між циліндричною та конусоподібною частинами відстійника; R_1 , R_2 та R_e — радіуси поперечних перерізів верхньої частини, дна відстійника та області живлення, відповідно. Після нескладних перетворень $A(z)$ можна представити у вигляді:

$$A(z) = \begin{cases} \pi R_1^2 & \text{при } z \leq z_0 \\ \pi \left(\frac{R_2 - R_1}{z_{\max} - z_0} (z - z_0) + R_1 \right)^2 & \text{при } z > z_0 \end{cases} \quad (3)$$

Звідси знаходимо, що

$$\frac{\partial A(z)}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{при } z \leq z_0 \\ 2\pi \frac{R_2 - R_1}{z_{\max} - z_0} \left(\frac{R_2 - R_1}{z_{\max} - z_0} (z - z_0) + R_1 \right) & \text{при } z > z_0 \end{cases} \quad (4)$$

Для зручності реалізації чисельного рішення задачі область відстійника розбиваємо на дві частини: зона очищення (від верхньої частини відстійника $z = 0$ до зони живлення $z = z_e$) та зона осідання (від зони живлення до дна відстійника $z = z_{\max}$). Для того щоб завершити формулювання моделі, необхідно задати граничні умови для рівняння (1) на верхній ($z = 0$) та нижній ($z = z_{\max}$) границях відстійника, а також дві умови на границі вприскування ($z = z_e$).

Оскільки концентрація завислих речовин є неперервною функцією у всьому об'ємі відстійника, то на основі закону неперервності потоку можна записати наступні умови на вищевказаних границях (з урахуванням спрямування швидкостей потоку V_1 та V_2 у верхній та нижній зонах відповідно).

- на впуску очищеної води:

$$\left(-A(z)V_1X + A(z)V_SX - D \frac{\partial A(z)X}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = -(V_1A(z)X) \Big|_{z=0} \quad (5)$$

- на границі вприскування зверху:

$$\left(-A(z)V_1X + A(z)V_SX - D \frac{\partial A(z)X}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_e-0} = -(V_1A(z)X) \Big|_{z=z_e-0} \quad (6)$$

- на границі вприскування знизу:

$$\left(V_2A(z)X + V_S A(z)X - D \frac{\partial A(z)X}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_e+0} = (V_2A(z)X) \Big|_{z=z_e+0} \quad (7)$$

- на дні відстійника:

$$\left(V_2A(z)X + V_S A(z)X - D \frac{\partial A(z)X}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_{\max}} = (V_2A(z)X) \Big|_{z=z_{\max}} \quad (8)$$

На основі залежностей (5) та (8) з урахуванням значення похідної $A(z)$ на дні відстійника

$$\left. \frac{\partial A(z)}{\partial z} \right|_{z=z_{\max}} = 2\pi \frac{R_2 - R_1}{z_{\max} - z_0} R_2$$

легко отримати дві шуканих граничних умови на верхній та нижній границях відстійника

$$\left(V_S X - D \frac{\partial X}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0, \quad (9)$$

$$\left(A_2 V_S X - 2\pi \frac{R_2 - R_1}{z_{\max} - z_0} R_2 D X - A_2 D \frac{\partial X}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_{\max}} = 0. \quad (10)$$

Очевидно, що на границі розділу зон внаслідок неперервності функції $X(z)$ є справедливою умова

$$X|_{z=z_e-0} = X|_{z=z_e+0} = X_e \quad (11)$$

Початкова умова для обох зон

$$X|_{t=0} = X_0 \quad (12)$$

Наведена крайова задача була вирішена чисельними методами у програмному середовищі Borland Delphi.

Результати та дискусія.

Отримане рішення було випробуване для розрахунку реального каналізаційного відстійника вертикального типу, що застосовується для розділення мулово-водяної суміші на очисній станції Рулебен міста Берлін [11]. Для апробації було обрано відстійники, що працюють у лінії 2 блоку А станції. У табл. 1 наведені основні параметри розрахункового відстійника, а у табл. 2 — експериментальні дані щодо витрат та концентрацій завислих речовин для мулово-водяної суміші на вході до відстійника, а також очищеної води та мулу на виході з нього.

Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

Таблиця 1 — Конструктивні характеристики відстійника

Назва параметру	Умовне позначення	Величина	Одиниці вимірювання
Діаметр верхньої частини	D	12,5	м
Діаметр нижньої частини	d	0,4	м
Площа верхньої частини	S	122,656	м ²
Площа нижньої частини	s	0,126	м ²
Глибина переходу на конічну форму	z ₀	4,64	м
Глибина місця вприскування	z _e	4,64	м
Відмітка низу відстійника	z _{max}	14,55	м
Об'єм відстійника	W	979	м ³

Таблиця 2 — Технологічні параметри відстійника

Дата	Вхід			Вихід					
	Мулово-водяна суміш			Очищена вода			Мул		
	Витрата		КЗР ¹	Витрата		КЗР ¹	Витрата		КЗР ¹
	л/с	м ³ /год	г/л	л/с	м ³ /год	мг/л	л/с	м ³ /год	г/л
18.01.2008	48,85	175,86	3,08	20,32	73,152	2	28,53	102,708	4,67
25.01.2008	49,58	178,488	3,39	21,93	78,948	3	27,65	99,54	5,21
01.02.2008	48,49	174,564	3,28	21,82	78,552	4	26,67	96,012	5,34
29.02.2008	47,91	172,476	2,93	21,09	75,924	3	26,82	96,552	4,64
17.03.2008	54,76	197,136	2,77	28,51	102,636	5	26,25	94,5	5,91
31.03.2008	45,05	162,18	2,44	19,22	69,192	6	25,83	92,988	4,16
04.04.2008	45,23	162,828	2,54	19,23	69,228	2	26,00	93,6	4,15
30.04.2008	46,30	166,68	3,31	20,70	74,52	2	25,60	92,16	4,78

¹КЗР — концентрація завислих речовин.

За відсутності експериментальних даних щодо швидкості осідання мулу, розрахунки проводились, виходячи з припущення, що швидкість осідання за увесь розрахунковий період не змінювалась. Таке припущення є доцільним з метою апробації моделі, а також при використанні моделі для цілей прогнозування. Проте для отримання більш точних розрахунків бажано проводити додаткові

експерименти з метою з'ясування коефіцієнтів для залежності (2) стосовно швидкості осідання пластівців мулу, які є характерними для даної мулово-водяної суміші.

На рис. 3 та рис. 4 наведені результати порівняння експериментальних та розрахункових даних стосовно концентрації завислих речовин X в очищеній воді та мулі на виході з відстійника.

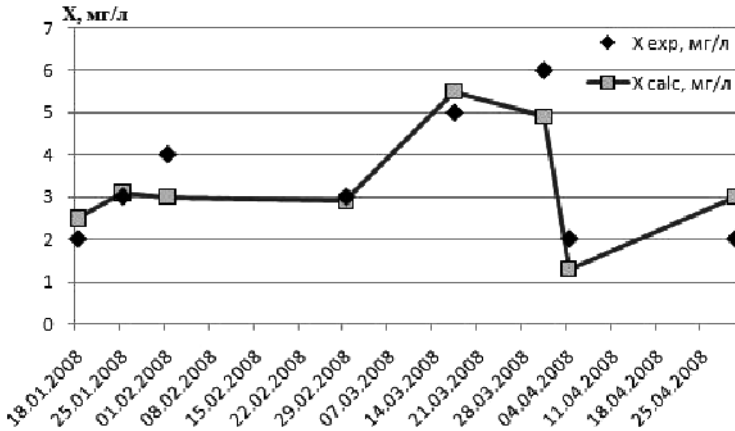


Рис. 3. Експериментальні та розрахункові концентрації завислих речовин в очищеній воді.

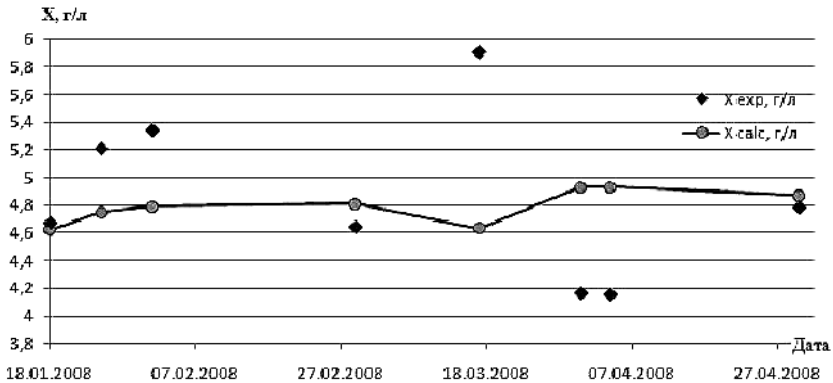


Рис. 4. Експериментальні та розрахункові концентрації завислих речовин в мулі.

Як видно з рисунків, отримані розрахункові дані цілком задовільно описують роботу споруди. Найявні розходження можна пояснити головним чином тим, що властивості реального мулу, а отже його здатність до осідання була різною в різні проміжки часу. Це підтверджує той факт, що муловий індекс та температура стічних вод за досліджуваний інтервал змінювались відповідно від 89 до 189 мл/г та від 18 до 28,5°C (за експериментальними даними, наданими співробітниками Рулебену). А ці параметри, безумовно, мають вплив і на швидкість осідання мулу, як це зазначалось раніше [12].

Висновки. Запропонована математична модель вторинного відстійника вертикального типу на відміну від традиційних моделей враховує зміну швидкості потоку по висоті споруди, пов'язану зі зміною площі перерізу при конусоподібному дніщі. Модель була апробована на експериментальних даних, результати порівняння яких з відповідними розрахунковими даними, дозволяють зробити висновок про доцільність використання моделі для цілей практики.

* * *

1. Состояние источника централизованного водоснабжения и его влияние на качество природной воды / В.В. Гончарук, Н.А. Клименко, В.Ф. Скубченко, В.В. Медведовский. — Химия и технология воды, 6 (2005), т. 27. — С. 559—582.

2. Степовая Н.Г. Экологические аспекты введения сточных вод в грунт / Н.Г. Степовая. — Энерготехнологии и ресурсосбережение, 1 (2010), 66—71.

3. Simulation der Verbringung von gereinigtem Abwasser in Boden / N. Stepova, V. Siry, R. Hinkelmann, M. Barjenbruch. — GWF Wasser/Abwasser, 5 (2009), P. 367—371.

4.] David R. Settler dynamic modeling and MATLAB simulation of the activated sludge process/ R. David, J.-L. Vasel, A. VandeWouwer. — Chemical Engineering Journal, 146 (2009). P. 174—183.

5. Modeling and numerical simulation of secondary settlers: A Method of Lines strategy / R. David, P. Saucez, J.-L. Vasel, A. VandeWouwer. — Water Research 43 (2009). — P. 319—330.

6. Теоретический анализ процессов осаждения в системах биологической очистки сточных вод / А.Я. Олейник, Ю.И. Калу-

гин, Н.Г. Степовая, С.М. Зябликов Прикладная гидромеханика, 4 (2004). — Т. 78. — Р. 62—67.

7. Степова Н.Г. Апробація одновимірної математичної моделі, що описує процеси у вторинному відстійнику вертикального типу / Н.Г. Степова. — Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 13 (2009). — С. 81—90.

8. Diehl S. The solids-flux theory — Confirmation and extension by using partial differential equations / S. Diehl. — Water Research, 42 (2008). — P. 4976—4988.

9. One-dimensional modelling of the secondary clarifier factors affecting simulation in the clarification zone and the assessment of the thickening flow dependence / B.G. Plosz, M. Weiss, C. Printemps, K. Essemiani, J. Meinhold. — Water Research, 41(2007). — P. 3359—3371.

10. Modeling and pilot-scale experimental verification for predenitrification process / J. Hamilton, R. Jain, P. Antoniou, S.A. Svoronos, B. Koopman, G. Lyberatos. — Journal of Environmental Engineering — American Society of Civil Engineers, 118 (1992). — P. 38—55.

11. Stepova N. Validierung eines Modells fur Nachklärbecken / N. Stepova, M. Barjenbruch. — Wasserwirtschaft Wassertechnik, 3 (2009). — P. 26—31.

12. Stanoveni sedimentacni rychlosti pro vypocet dosazovacich nadrzi / N. Stepova, J. Pollert, Z. Konicek, Z. Handova. — Stavebni Obzor, 4(2009). — P. 124—128.

Отримано: 7.09.2010 р.