

ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

УДК 628.543

<https://doi.org/10.31713/vt120233>

Ковальчук В. А., д.т.н., професор, Когут С. В., аспірант
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, v.a.kovalchuk@nuwm.edu.ua, s.v.kogut@nuwm.edu.ua)

ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ SBR-РЕАКТОРІВ ЗА МЕТОДИКОЮ ATV-M 210

У статті розглянуто особливості методики ATV-M 210 розрахунку біологічних реакторів періодичної дії (Sequencing Batch Reactors – SBR-реакторів), що використовується в Німеччині. Ця методика забезпечує уніфікований підхід до розрахунку, що дає змогу замовникам та проєктувальникам порівнювати різні пропозиції за однаковими критеріями. Описано основні фази процесу очистки в SBR-реакторах та головні параметри процесу, що використовуються при розрахунку.

Ключові слова: біологічна очистка стічних вод; SBR-реактор; методика розрахунку; очисні споруди.

Постановка проблеми. Існуючі системи біологічної очистки з активним мулом є дуже чутливими до мінливості складу і витрати очищуваних стічних вод. Для усунення такого негативного впливу знайшла застосування технологія SBR, яка є модифікацією класичної системи очищення стічних вод з активним мулом, але менш чутливою до коливань якості і кількості очищуваних стічних вод.

Сучасний рівень розвитку очищення стічних вод активним мулом в SBR-реакторах було досягнутий завдяки дослідженням Ірвайна із співробітниками в 60-х роках минулого століття. Власне Ірвайн вперше використав і термін SBR-технологія для позначення періодичного біологічного процесу [1; 2; 3]. Спочатку SBR-реактори в основному використовувалися для очистки стічних вод на комунальних очисних спорудах. Завдяки гнучкості конструкції і кращому контролю за процесами очистки, високому ступеню автоматизації процеси SBR знайшли широке застосування і при біологічному очищенні промислових стічних вод, які містять важко окислювані органічні сполуки [4]. За останні декілька десятиліть

SBR-технології зазнали змін задля ефективної очистки від нових забруднюючих речовин в стічних водах.

В системах SBR кожен аеротенк може мати п'ять основних фаз роботи [5; 6]. Тривалість кожної фази в аеротенку можна пристосувати для різних потреб очищення, як-от видалення органічних речовин, нітрифікація, денітрифікація, дефосфатація тощо. На рисунку схематично показано різні фази роботи системи SBR. Враховуючи цю обставину, розглядається і процес розрахунку об'єму аеротенка під час здійснення усіх цих фаз.

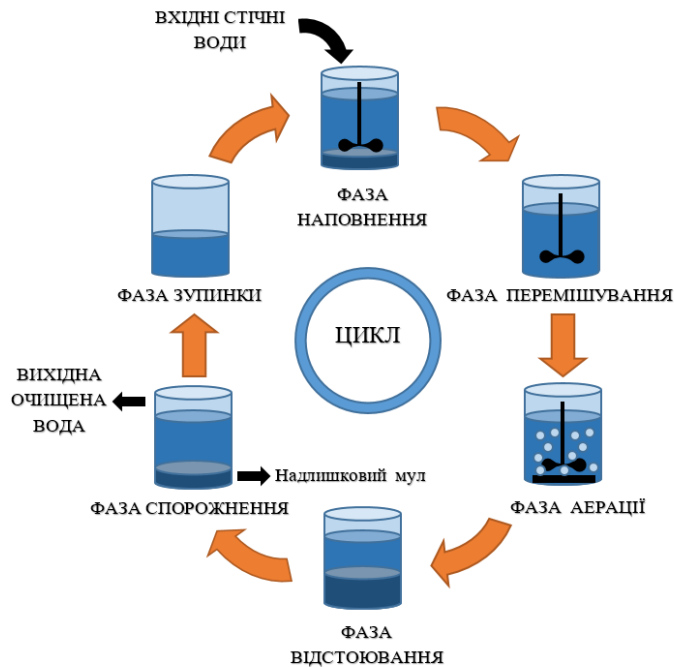


Рисунок. Приклад послідовності фаз процесу впродовж циклу

У світовій практиці так склалося, що розрахунок біологічних реакторів періодичної дії зазвичай виконується відповідно до методики ATV-M 210 «Системи активного мулу з накопичувальним режимом», розробленої Німецькою асоціацією з питань води, стічних вод та відходів. Ця методика разом з німецькими методиками ATV-A 122 (1991), ATV-A 126 (1993) і ATV-DVWK-A 131 (2000) ATV узагальнила досвід розробки установок з використанням активного мулу, наявний у Німеччині.

Метою роботи є розгляд та аналіз методики ATV-M 210, результатів її застосування для вітчизняних умов при розрахунку

технології очистки стічних вод від органічних забруднень та сполук азоту і фосфору, що дозволить уточнити параметри і на основі їх аналізу підвищити ефективність застосування цієї технології на очисних спорудах з використанням SBR-реакторів.

Результати досліджень. Методика розрахунку ATV-M 210 не поширюється на очисні споруди, які також працюють в періодичному режимі, але в яких для очищення стічних вод використовується біоплівка (наприклад, біоплівковий реактор періодичної дії (Sequencing Biofilm Batch Reactor, SBBR). Методика поширюється тільки на очисні споруди з приєднаним навантаженням 50 еквівалентних жителів і більше. Для очисних споруд з приєднаним навантаженням менше 50 еквівалентних жителів принципи будівництва та випробувань публікуються Німецьким інститутом будівельної техніки (Deutsches Institut für Bautechnik).

Біологічний реактор періодичної дії (SBR) – це система очистки стічних вод з активним мулом, що працює за принципом наповнення і спорожнення резервуару для очистки стічних вод. Очисні споруди можна використовувати для значного видалення розчинених органічних компонентів стічних вод, а також для нітрифікації, денітрифікації та видалення фосфору. У цій системі стічні води подаються в один реактор «періодичної дії», обробляються для видалення небажаних компонентів, а потім скидаються. Процеси усереднення, аерації та вторинного відстоювання відбуваються в одному і тому ж реакторі періодичної дії. Для оптимізації продуктивності системи можуть використовуватись два або більше реакторів періодичної дії в заздалегідь визначеній послідовності операцій. Системи SBR успішно використовуються як для очистки комунальних, так і промислових стічних вод. Вони ідеально підходять для очищення стічних вод, що характеризуються низькими навантаженнями або переривчастими умовами надходження стічних вод.

Важливим при розрахунку SBR-реакторів є поняття циклу очистки. **Цикл очистки** – це інтервал часу для здійснення біологічних процесів та для відділення активного мулу від очищеної води, а також для скидання очищеної води та надлишкового мулу. Сюди можна включити також фазу зупинки. Кожен цикл ділиться на певну послідовність фаз процесу очистки стічних вод, що надійшли в реактор. Тривалість, послідовність та повторюваність кожної фази в циклі завдяки автоматизації процесу очистки може змінюватись

залежно від якості стічних вод, що подаються до реактора. Це робить SBR-реактори надзвичайно гнучкими для адаптації до нормативних змін щодо параметрів стічних вод, таких, наприклад, як видалення біогенних елементів.

В SBR-реакторі відбуваються такі фази процесу очистки:

Фаза наповнення – інтервал часу, протягом якого в резервуар подаються стічні води.

Фаза перемішування – інтервал часу, протягом якого вміст резервуара перемішується без подачі кисню та встановлюються безкисневі та/або анаеробні умови середовища.

Фаза аерації – інтервал часу, протягом якого відбувається аерація вмісту реактора.

Фаза відстоювання – інтервал часу, протягом якого активний мул осідає.

Фаза реакцій – інтервал часу, протягом якого відбуваються аеробні або безкисневі біологічні процеси.

Фаза спорожнення – інтервал часу, протягом якого видаляється очищена стічна вода та надлишок мулу.

Фаза зупинки – інтервал часу, протягом якого резервуар очікує на нове заповнення (опціонально).

Робоча фаза – інтервал часу, що включає час циклу мінус час очікування або час простою.

Ефективність очищення та стабільність процесу системи активного мулу з накопиченням постійно визначаються такими параметрами процесу як:

- **час циклу;**
- **тривалість окремих фаз процесу;**
- **коефіцієнт об'ємного обміну;**
- **видалення надлишкового мулу (для встановленого віку мулу).**

На першому етапі розрахунку важливою є характеристика стічних вод, які будуть очищатися в SBR-реакторі. В якості вхідних даних з гідравлічного навантаження надаються такі параметри, як максимальна добова, середньодобова та максимальна годинна витрата стічних вод на вході в очисні споруди. Важливими є також такі параметри, як рН, температура, біологічна потреба в кисні ($B_{d,BSB}$), загальний вміст завислих речовин ($B_{d,TS}$), добове навантаження за азотом ($B_{d,TKN}$) та фосфором ($B_{d,P}$) та відповідно їх концентрації.

Добовий приріст мулу, що утворюється в SBR-реакторі, складається з завислих речовин, що утворюються в процесі

окислення органічних речовин ($\dot{U}S_{d,C}$) та мулу, що утворюється в результаті видалення фосфору ($\dot{U}S_{d,P}$):

$$\dot{U}S_d = \dot{U}S_{d,C} + \dot{U}S_{d,P}, \text{ кг/добу.} \quad (1)$$

Емпіричне рівняння з коефіцієнтами Хартвіга застосовується для розрахунку добового приросту мулу в результаті видалення вуглецю [8]:

$$\dot{U}S_{d,C} = B_{d,BSB} \cdot \left(0,75 + 0,6 \cdot \frac{X_{TS,ZB}}{C_{BSB,ZB}} - \frac{(1-0,2) \cdot 0,17 \cdot 0,75 \cdot t_{TS} \cdot F_T}{1 + 0,17 \cdot t_{TS} \cdot F_T} \right), \quad (2)$$

де $B_{d,BSB}$ – добове навантаження за БПК₅ на вході в очисні споруди, кг/добу;

$X_{TS,ZB}$ – загальна концентрація завислих речовин на вході в очисні споруди, мг/дм³;

$C_{BSB,ZB}$ – значення БПК₅ на вході в очисні споруди, мг/дм³;

t_{TS} – проєктний вік осаду;

F_T – температурний фактор для ендогенного дихання.

$$F_T = 1,072^{(T-15)}, \quad (3)$$

де T – температура, (10° С).

Значення табл. 1 були розраховані та усереднені за допомогою рівняння 2 для $T = 10^\circ \text{C} - 12^\circ \text{C}$ [7].

Таблиця 1

Питомий приріст мулу $\dot{U}S_{C,BSB}$ (кг сухої речовини/кг БПК₅)
при 10–12° С

$X_{TS,ZB} / C_{BSB,ZB}$	Вік мулу, доба					
	4	8	10	15	20	25
0,4	0,79	0,69	0,65	0,59	0,56	0,53
0,6	0,91	0,81	0,77	0,71	0,68	0,65
0,8	1,03	0,93	0,89	0,83	0,8	0,77
1	1,15	1,05	1,01	0,95	0,92	0,89
1,2	1,27	1,17	1,13	1,07	1,04	1,01

Добовий приріст мулу, що утворюється в результаті видалення фосфору ($\dot{U}S_{d,P}$), розраховується наступним чином:

$$\dot{U}S_{d,P} = Q_d \cdot (3 \cdot X_{P,Biop} + 6,8 \cdot X_{P,Fall,Fe} + 5,3 \cdot X_{P,Fall,Al}) / 1000, \quad (4)$$

де Q_d – розрахункова добова витрата стічних вод на вході в очисні споруди, м³/добу;

$X_{P,Biop}$ – кількість біологічно зв'язаного фосфору, що видаляється шляхом біологічного видалення, г/дм³;

$X_{P,Fäll,Fe}$ – кількість фосфору, що видаляється шляхом осадження додаванням Fe³⁺, г/дм³;

$X_{P,Fäll,Al}$ – кількість фосфору, що видаляється шляхом осадження додаванням Al³⁺, г/дм³.

Маса сухої речовини мулу в аеротенку становить:

$$M_{TS,BB} = t_{TS,Bem} \cdot \dot{U}S_d, \text{ кг}, \quad (5)$$

де $t_{TS,Bem}$ – розрахунковий необхідний вік мулу, діб (вибирається згідно з табл. 2) [7].

На другому етапі розраховують необхідний об'єм реактора для досягнення потрібної швидкості реакції. Другий етап включає також розрахунок параметрів циклу та послідовність фаз роботи біореактора.

У системі SBR-реактора **розрахунковий необхідний вік мулу** пов'язаний із тривалістю фази реакції (t_R), яка визначається із тривалості циклу (t_Z) після вирахування тривалості седиментації (t_{Sed}) і тривалості скидання чистої води (t_{Ab}), можливо, одна анаеробна фаза для біологічного видалення фосфатів (t_{BioP}) і, можливо, фаза зупинки (t_{Still}). Якщо вибрано статичне заповнення (тобто без аерації та/або змішування під час фази заповнення), необхідно також відняти тривалість фази заповнення (t_F).

$$t_R = t_Z - t_{Sed} - t_{Ab} - t_{BioP} - t_F - t_{Still}, \text{ год.} \quad (6)$$

Свою чергою тривалість фази реакції (t_R) є сумою тривалості фази нітрифікації t_N (год) та тривалості фази денітрифікації t_D (год):

$$t_R = t_N + t_D, \text{ год.} \quad (7)$$

Таблиця 2

Розрахунковий вік мулу в добах залежно від мети очищення та температури, а також розміру очисних споруд (проміжні значення підлягають оцінці)

Ціль очищення	Розмір очисної станції $V_{d.BSB.Z}$			
	до 1 200 кг/добу		більше 6 000 кг/добу	
Розрахункова температура	10° С	12° С	10° С	12° С
Без нітрифікації	5		4	
З нітрифікацією	10	8,2	8	6,6
З видаленням азоту				
$V_D/D_{BB}=0,2$	12,5	10,3	10,0	8,3
$V_D/D_{BB}=0,3$	14,3	11,7	11,4	9,4
$V_D/D_{BB}=0,4$	16,7	13,7	13,3	11,0
$V_D/D_{BB}=0,5$	20,0	16,4	16,0	13,2
Стабілізація осаду в т.ч. видалення азоту	25		не рекомендовано	

Інша величина, яка використовується в розрахунках, це **кількість циклів** протягом доби m_z :

$$m_z = \frac{24}{t_z}, \text{ доба}^{-1}. \quad (8)$$

Це найбільш зрозуміло для обслуговуючого персоналу, коли вони працюють з $m_z = 1, 2, 3, 4$ або 6 на день, коли на підприємствах працюють з такою ж кількістю змін.

Коефіцієнт об'ємного обміну визначається як відношення об'єму стічної води, видаленої протягом одного циклу (ΔV) і об'єму резервуара, коли він заповнений (V_R)

$$f_A = \frac{\Delta V}{V_R}. \quad (9)$$

Коефіцієнт об'ємного обміну (f_A) і тривалість циклу (t_z) є параметрами, які залежать один від одного.

Збільшуючи або зменшуючи коефіцієнт об'ємного обміну, відповідно збільшується або зменшується навантаження складових стічної води, що подається в індивідуальний резервуар. Відповідно, тривалість фази реакції (t_R), під час якої відбуваються біологічні перетворення (наприклад, аеробна та анаеробна фази), і, як наслідок, час циклу (t_z), має бути подовжено або скорочено.

Коефіцієнт об'ємного обміну $f_A > 0,5$ не є звичайним для стічних вод міста.

Дослідження на існуючих очисних станціях показали, що ефективність очищення в SBR-реакторах і здатність активного мулу до осадження зростають зі збільшенням частоти циклів (m_z), тобто зі збільшенням кількості циклів на добу. Однак ці позитивні ефекти мають місце лише в тому випадку, якщо на початку циклу вдається досягти значного збільшення концентрації субстрату. Це означає, що ці переваги можуть бути досягнуті лише при використанні більш концентрованих стічних вод. Величина необхідного збільшення концентрації також залежить від типу складових стічних вод.

Згідно з методикою розрахунку ATV M-210 необхідний розрахунковий об'єм біореактора знаходиться з двох умов. Перша умова виходить із залежності між реакційним об'ємом системи очистки (що складається з n резервуарів, кожен з об'ємом V_R) із сухою речовиною мулу TS_R та об'ємом резервуару активного мулу V_{BB} із сухою речовиною осаду TS_{BB} або необхідною масою мулу $M_{TS, BB}$:

$$n \cdot V_R \cdot TS_R = \left(V_{BB} \cdot TS_{BB} \cdot \frac{t_Z}{t_R} \right) = M_{TS, BB} \cdot \frac{t_Z}{t_R} = M_{TS, R}, \text{ кг.} \quad (10)$$

Звідси, об'єм одного SBR-реактора становить:

$$V_R = \frac{M_{TS, R}}{n \cdot TS_R}, \text{ м}^3. \quad (11)$$

Тривалість циклу t_z і суха речовина мулу TS_R повинні бути спочатку визначені і, за необхідності, скориговані на основі подальших гідравлічних розрахунків. Строго кажучи, перша умова для визначення об'єму обчислюється за допомогою рівняння (10) з того, що маса активного мулу в системі очистки, еквівалентна об'єму активного мулу.

За другою умовою для визначення об'єму резервуара має бути виконано таке гідравлічне співвідношення:

$$V_R = \frac{\int_0^t Q_{\max} \cdot dt}{f_{A, \max}} = \frac{Q_m \cdot (t_Z / n)}{f_{A, \max}}, \text{ м}^3. \quad (12)$$

Інтеграл представляє собою максимальний об'єм наповнення внаслідок максимального притоку. Він розраховується на основі гідрографу максимального притоку для періоду $t = t_z/n$. У більшості

випадків об'єм за рівнянням (12) є визначальним для комунальних систем через високий приплив стічних вод під час дощу.

Згідно з рівнянням (10), об'єм V_R збільшується зі зменшенням тривалості циклу, тому що t_z/t_R стає більшим за рахунок переважно постійних тривалостей t_{sed} , t_{Ab} і т.д. Згідно з рівнянням (12), навпаки, об'єм наповнення зменшується. Відповідно до рівняння (12) справедливо і зворотне, тому що об'єм наповнення стає меншим зі зменшенням тривалості циклу. Згідно з рівнянням (12), можна було б вибрати $f_{A,max}$ якомога більшим. Однак це обмежується об'ємом осаду. Тому для попереднього розрахунку рекомендується розраховувати об'єм V_R згідно з рівнянням (12) з $f_{A,Vor} = 0,4$. Індекс «Vor» у $f_{A,Vor}$ повинен вказувати на те, що це попередньо задане значення.

Для подальших розрахунків використовується більше з двох значень V_R , розрахованих згідно з рівняннями (11) і (12). Якщо V_R має більше значення згідно з рівнянням (12), необхідно скоригувати суху речовину осаду:

$$TS_{R(нове)} = TS_R \cdot \frac{V_R(\text{формула 11})}{V_R(\text{формула 12})} = \frac{M_{TS,R}}{V_R(\text{формула 12})}, \text{ кг/м}^3. \quad (13)$$

Висновки. Розрахунок SBR-реакторів для біологічної очистки стічних вод доцільно здійснювати за німецькими нормами розрахунку ATV M-210. Об'єм біореактора визначається, виходячи з двох умов. Перша умова визначається необхідною масою активного мулу в резервуарі аеротенка, друга враховує гідралічні умова надходження стічних вод. Для подальших розрахунків приймається більше з двох отриманих значень об'єму реактора.

1. Irvine R. L., Busch A. W. Sequencing Batch Biological Reactors. An Overview. JWPCF, 51, 1979. 235 p. 2. Irvine R. L. und Ketchum Jr., L. H. Sequencing Batch Reactor for Biological Wastewater Treatment. CRC Crit. Rev. Environ. Control. 1988. Vol. 18, Issa 4. C. 225–294. 3. Irvine R. L. Controlled Unsteady State Processes and Technologies – An Overview. Proceedings von der 1. IAWQ Specialized Conference on SBR-Technology, München, 1996. 4. Bartkowska I., Klaus W. Aanaliza skuteczności działania oczyszczalni ścieków pracującej w systemie SBR. *Economia i Srodowisko*. 5. Mikkelsen J. AquaSBR Design Manual. New York, 1995. 205 p. 6. NEIWPC, Ronald F. Poltak. Sequencing Batch Reactor Design and Operational Considerations Manual. Lowell, MA, 2005. 24 p. 7. ATV-DVWK-Kommentar, Kayser Rolf. Bemessung von Belebungs- und SBR-Anlagen: Kommentar zum ATV-M 210. Hennef, 2001. 122 p. 8. ATV-Handbook. Biological and advanced wastewater treatment. Berlin : Emst Sohn, 1997.

REFERENCES:

1. Irvine R. L., Busch A. W. Sequencing Batch Biological Reactors. An Overview. JWPCF, 51, 1979. 235 p.
 2. Irvine R. L. und Ketchum Jr., L. H. Sequencing Batch Reactor for Biological Wastewater Treatment. CRC Crit. Rev. Environ. Control. 1988. Vol. 18, Issa 4. C. 225–294.
 3. Irvine R. L. Controlled Unsteady State Processes and Technologies – An Overview. Proceedings von der 1. IAWQ Specialized Conference on SBR-Technology, München, 1996.
 4. Bartkowska I., Klaus W. Aanaliza skuteczności działania oczyszczalni ścieków pracującej w systemie SBR. *Economia i Srodowisko*.
 5. Mikkelson J. AquaSBR Design Manual. New York, 1995. 205 p.
 6. NEIWPC, Ronald F. Poltak. Sequencing Batch Reactor Design and Operational Considerations Manual. Lowell, MA, 2005. 24 p.
 7. ATV-DVWK-Kommentar, Kayser Rolf. Bemessung von Belebungs- und SBR-Anlagen: Kommentar zum ATV-M 210. Hennef, 2001. 122 p.
 8. ATV-Handbook. Biological and advanced wastewater treatment. Berlin : Emst Sohn, 1997.
-

**Kovalchuk V. A., Doctor of Engineering, Professor, Kohut S. V.,
Post-graduate Student** (National University of Water and Environmental
Engineering, Rivne)

DETERMINATION OF THE SBR REACTORS VOLUME BY THE ATV-M 210 METHOD

The article discusses the specifics of the ATV-M 210 method for calculating Sequencing batch reactors (SBR), which is used in Germany. The main advantages are considered, the main phases of the wastewater treatment process in SBR reactors are described – the phases of filling, mixing, aeration, settling, reactions, emptying and stopping. The efficiency of cleaning and the stability of the process are determined by such process parameters as the cycle time, the duration of individual phases of the process, the volume exchange coefficient, the removal of excess sludge (for the established age of the sludge). The main parameters of the process used in the calculation are the age and specific sludge production. Tables are given for obtaining sludge age values depending on the size of the treatment plant and the temperature of treated wastewater, the target of wastewater treatment, the ratio of the volume of the denitrification zone to the total volume of bioreactors. In turn, specific sludge

production is recommended to be determined by the suspended solids and BOD₅ concentrations ratio in the treated wastewater, the age of the sludge and the treated wastewater temperature. The ATV-M 210 methodology provides a unified approach to the calculation of SBR reactors, which allows customers and designers to compare different proposals according to the same criteria.

***Keywords:* biological wastewater treatment; SBR reactor; calculation method; wastewater treatment plants.**
