

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра Гідравліка та водопостачання

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття кваліфікаційного ступеня «магістр»

Галузь знань 19 Архітектура та будівництво
Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія
Спеціалізація Водопостачання та водовідведення
Тема Експериментальне дослідження біологічної очистки води

Керівник магістерської роботи	проф. Біляєв М.М.
Студент	Липницький Артем Валентинович

Дніпро
2020 р.

Анотація.

Вступ

Розділ 1 Біотехнологія очищення стічних вод

Розділ 2 Біологічне очищення води на підприємствах

2.1. Вимоги до промислових стоків для безперешкодного відведення в каналізацію.

2.2. Вимоги до промислових стоків для скидання в центральну каналізацію.

2.3. Біологічні методи, що застосовуються для очищення стоків промислових підприємств.

Розділ 3 Біологічне очищення води. Вибір, характеристика, розрахунок споруд біологічного очищення стічних вод

3.1 Розрахунок первинного відстійника

3.2. Розрахунок аеротенку

3.3. Розрахунок вторинного відстійника

Розділ 4 Методи розрахунку біофільтрів

Розділ 5 Аеротенк

Розділ 6 Експериментальне дослідження біологічної очистки води

Розділ 7 Матиматичне моделювання біологічної очистки води

Висновки

Список використаних джерел

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена дослідженню процесу біологічної очистки стічних вод в біореакторі. Дослідження проведене на базі лабораторного експерименту, та за допомогою обчислювального експерименту на базі кафедри «Гідравліка та водопостачання » ДНУЗТ. Отримані дані можуть бути використані для підвищення ефективності очистки води на станціях аерації .

Мета роботи : Експериментальне та теоретичне дослідження процесу біологічної очистки стічних вод.

Об'єкт дослідження – процес міграції субстрату в біореакторі.

Предмет дослідження – визначення ефективності роботи біореактору .

Методи дослідження – лабораторний експеримент та математичне моделювання .

Практичне значення одержаних результатів. Отримані дані можуть бути використані для підвищення ефективності очистки води на станціях аерації.

Ключові слова : очистка води, біореактор, експеримент, математичне моделювання .

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the study of the process of biological wastewater treatment in a bioreactor. The study was CONDUCTED on the basis of a laboratory experiment, and with the help of a computational experiment on the basis of the Department of Hydraulics and Water Supply of DNUZT. The obtained data can be used to increase the efficiency of water purification at aeration stations.

Purpose: Experimental and theoretical study of the process of biological wastewater treatment.

The object of study - the process of migration of the substrate in the bioreactor.

The subject of research is to determine the efficiency of the bioreactor.

Research methods - laboratory experiment and mathematical modeling.

The practical significance of the obtained results. The obtained data can be used to increase the efficiency of water purification at aeration stations.

Keywords: water purification, bioreactor, experiment, mathematical modeling.

ВСТУП

Біологічна очистка стічних вод широко використовується в усіх країнах світу, тому що представляє собою ефективний засіб ліквідації органічних забруднень. На етапі проектування споруд біологічної очистки, реконструкції існуючих біореакторів виникає потреба швидко оцінити ефективність роботи споруд для нових умов експлуатації. З часом, конструкції біореакторів, режими їх роботи суттєво ускладнились. Дуже часто умови експлуатації сучасних біореакторів відрізняються від «типових», коли, для розрахунку біореакторів, достатньо використовувати існуючі інженерні методи розрахунку. Інженерні методи не враховують ряд важливих параметрів, що впливають на процес біологічного очищення стічних вод, наприклад, інженерні методики не враховують форму біореактору, присутність рухомих носіїв біоценозу, наявність додаткових конструктивних елементів в споруді, тощо. На сьогодні, розроблена значна кількість математичних моделей, що дозволяють, з різним ступенем наближення, визначати ефективність роботи біореакторів. Але, існуючі математичні моделі не враховують ряд важливих параметрів, що впливають на ефективність роботи біореакторів: геометричну форму та конструктивні особливості реакторів, гідродинаміку руху в них активного мулу та субстрату, наявність додаткових елементів, різні режими експлуатації. Ефективність процесів біологічного очищення стічних вод залежить від низки факторів, одні з яких можна регулювати в широких діапазонах, а інші, наприклад склад стічних вод, практично не піддаються регулюванню. Температура є одним з основних факторів, що забезпечує ефективність і високу продуктивність споруд біологічного очищення. Оптимальною температурою для аеробних процесів, що відбуваються в біологічних окиснювачах, є 20—30°C, при цьому біоценоз при інших сприятливих умовах повинен бути представлений різноманітними і добре розвиненими організмами. Слід зазначити, що для різних видів

організмів, зокрема бактерій, оптимальні температурні режими варіюють у межах від 4 до 85°C. На розвиток організмів впливає також активна реакція середовища (pH), адже значна частина живих істот найкраще розвивається у нейтральному або слабко лужному середовищі. Оптимальним для біологічного очищення вважається середовище з $\text{pH} = 6,5\text{—}7,5$. Відхилення pH за межі 6 і 8,5 зменшує швидкість окиснення внаслідок сповільнення обмінних процесів у клітині.

Таким чином, нормальний хід процесів біологічного очищення стічних вод від органічних забруднювальних речовин повинен забезпечуватися певними умовами. Якщо ці умови не дотримуються, необхідно їх коригувати:

- змінювати температурний режим за рахунок підігріву чи охолодження стічних вод;
- здійснювати нейтралізацію стічних вод;
- при нестачі біогенних елементів у стічних водах слід додавати їх штучно у вигляді суперфосфату, аміачної води, амофосу тощо.

В аеробних спорудах біологічного очищення повинна підтримуватися концентрація розчиненого кисню не менше 2 мг/л, інакше спостерігається зниження швидкості утилізації органічних сполук. Необхідна концентрація кисню в спорудах підтримується подачею повітря або технічного кисню за допомогою аераційних систем і аераторів.

При роботі біологічних очисних споруд здійснюється постійний контроль за концентрацією токсичних компонентів, які не повинні перевищувати ГДК. У процесі біологічного очищення подається така кількість стічних вод, що мають певну концентрацію органічних забруднювальних речовин, щоб не перевищувати величини добового навантаження цими забруднювальними речовинами у перерахунку на 1 м³ очисної споруди, на 1 г сухої біомаси або на 1 г беззольної частини біомаси. Практично всі органічні речовини можуть бути окиснені в аеробних умовах, хоча швидкість процесу їх окиснення варіюється в широкому діапазоні.

Біологічне очищення стічних вод називають повним, якщо БСК (біохімічне споживання кисню) очищеної стічної води становить менше 20 мг/л та неповним при БСК - понад 20 мг/л.

РОЗДІЛ 1

Біотехнологія очищення стічних вод

Біохімічне очищення базується на здатності деяких мікроорганізмів використовувати для свого розвитку органічні речовини, що містяться в стічних водах у колоїдному і розчиненому стані. Цей спосіб застосовується після очищення стічної води від мінеральних і нерозчинних органічних речовин. Він дає змогу майже повністю видалити забруднення органічного походження. Біохімічне очищення проводять у природних (на полях зрошення фільтрації або в біологічних ставах) і штучних умовах (в біологічних фільтрах, аеротенках, окислювальних каналах та інших типах окислювачів).

Виробничі і побутові стоки, що пройшли біологічне очищення, втрачають більшу частину бактерій, які в них містяться, але повністю вони можуть бути знищені тільки за допомогою дезінфекції – хлоруванням, електролізом, використанням бактерицидного промелю тощо.

Одним із методів, що збільшує ефективність біохімічного розкладання, є мікробний, який полягає у спеціальному вирощуванні мікроорганізмів, адаптованих до високих (на кілька порядків вище за середніх) концентрацій токсичних і важкоокислюваних вод, речовин, внаслідок чого процес очищення стічних вод стає ефективнішим. Перспективним є також підвищення фізіологічної активності мікроорганізмів різними хімічними мутагенами.

Вибір методу і технологічної схеми очищення стічних вод залежить від характеру та кількості забруднень, їх подальшого використання, необхідного ступеню очищення тощо.

На рис. 1.1 показана розповсюджена схема очищення побутових стічних вод і суміші побутових і виробничих стічних вод в разі використання для біохімічного очищення біологічних фільтрів. По такій схемі проектують очисні станції на середній витраті води від 5 до 30 тис. м³/доб.

Стічні води механічно і біохімічно очищаються, а потім дезінфікуються. Осад зброджують в метантанках, а обезводнюють і сушать на мулових майданчиках [15].

Осад із вторинних відстійників також направляють в метантенки. Для дезінфекції води використовують хлор. Приготовлену в хлораторній хлорну воду змішують з очищеною водою.

Обеззараження води відбувається в контактних резервуарах.

При зброджуванні осаду в метантанках утворюється газ, основою якого є метан. Цей газ використовують на потреби станції, в току числі для підігріву осаду в метантенках [13].

Сутність процесу біологічного очищення стічних вод полягає в тому, що в процесі фільтрації через ґрунт або зернисте середовище органічні забруднення затримуються в ньому, утворюючи біологічну плівку, населену великою кількістю мікроорганізмів. Плівка адсорбує колоїдні і розчинені речовини, дрібні суспензії і вони за допомогою аеробних бактерій в присутності кисню повітря перетворюються в мінеральні сполуки. Атмосферне повітря добре проникає у ґрунт на глибину 0,2-0,3 м, де і здійснюється найбільш інтенсивне біохімічне окислювання.

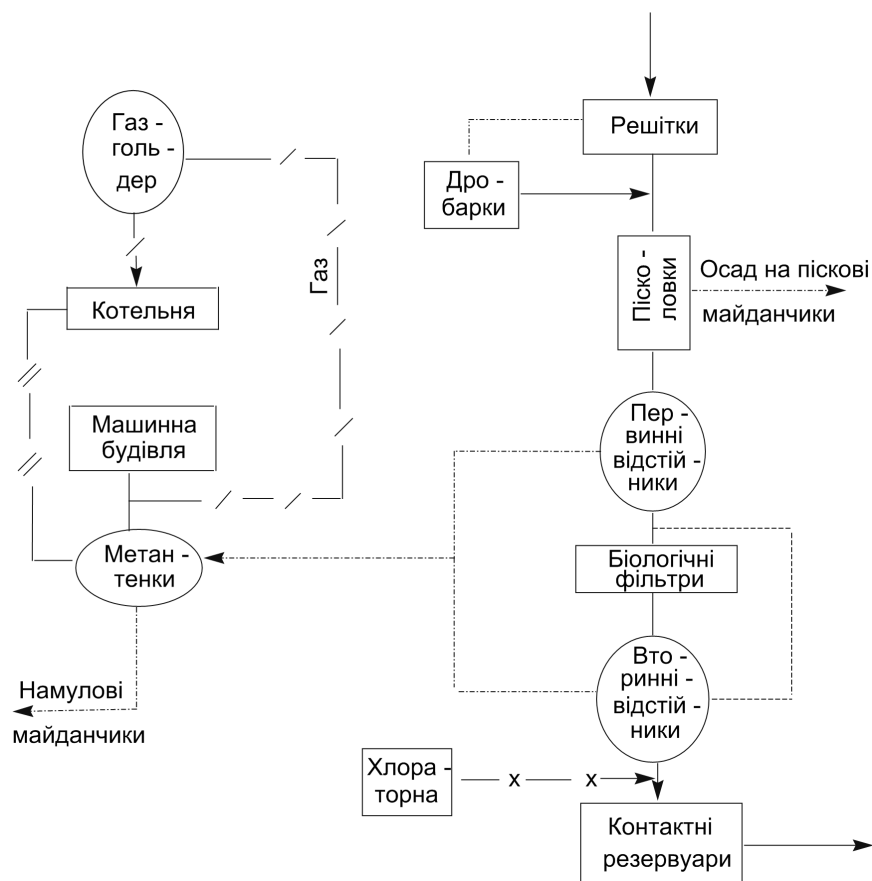


Рисунок 1.1 – Схема механічного і біологічного (на біологічних фільтрах) очищення стічних вод.

Споруди для очищення стічних вод розташовують таким чином, що вода проходить їх послідовно. У спорудах для механічного очищення спочатку затримують найбільш важкі і крупні завислі речовини, а потім відділяють основну масу нерозчинених забруднень. Далі у спорудах для біохімічного очищення видаляють тонкі суспензії, що залишились, колоїдні і розчинені забруднення. Після цього виконують обеззаражування стічних вод.

РОЗДІЛ 2

Біологічне очищення води на підприємствах

Санітарний стан природних водойм багато в чому залежить від того, наскільки ефективно прилеглі промислові об'єкти борються із забрудненням виведених ними каналізаційних відходів. В даному розділі розглянемо очищення стічних вод промислових підприємств, а також спеціальні очисні споруди, що використовуються підприємствами промисловості на території України. Очищення промислових стічних вод підприємств, побудованих в межах міста або в околицях міста і знаходяться в одній промисловій зоні, у багатьох може проводитися загальною системою знешкодження та очищення стоків для цілого ряду підприємств.



(<http://kanalizaciya.com.ua/ochistka-stochnyh-vod-promyshlennyh-predpriyatij.htm>)

Рисунок 2. Приклад очищення стоків на підприємствах в Україні

Крім того, підприємство може отримати в комунальних службах дозвіл на відведення стічних вод безпосередньо в мережу каналізації населеного пункту.

Для цього необхідно провести аналіз стоків, та у разі відповідності рівня забруднення стічних вод підприємства нормам, які регламентують відведення у каналізаційну мережу очищення промислових і побутових каналізаційних відходів буде проводитися спільно, використовуючи при цьому устаткування, що очищає стоки різної природи.

2.1. Вимоги до промислових стоків для безперешкодного відведення в каналізацію

Стічні води промислових підприємств досить часто містять в собі різні домішки, які можуть негативно вплинути на працездатність каналізаційної мережі та очисних споруд населеного пункту, а при скиданні їх у природні водойми - привести до порушення їх режиму водокористування.

Для запобігання негативного впливу стоків промислових підприємств на каналізаційну мережу, робочий режим очисних споруд стічних вод і на екологічну ситуацію водойм, які в результаті потрапляють очищені стічні води, ще до початку очищення слід здійснювати контроль за вмістом гранично допустимої концентрації (ГДК) шкідливих домішок.

Цю вимогу слід виконувати вже в процесі проектування, будівництва і введення в експлуатацію нових і реконструйованих промислових підприємств.

Крім того, на підприємствах слід застосовувати технології малоотходного і безвідходного типу, а також системи повторного або оборотного водопостачання.

Використовувані виробництва слід прагнути зробити безвідхідними і безстічними.

2.2. Вимоги до промислових стоків для скидання в центральну каналізацію



(<http://kanalizaciya.com.ua/ochistka-stochnyh-vod-promyshlennyh-predpriyatij.htm>)

Рисунок 2.2. - Установка очищення стічної води гальванічного виробництва.

При плануванні скидання стічних вод у центральну міську каналізаційну мережу, слід переконатися, що вони відповідають наступним вимогам:

- показник БПК₂₀ не повинен перевищувати показник, зазначений у проекті очисної споруди, використовуваного в даній каналізаційній мережі;
- стічні води не повинні викликати перебоїв в роботі каналізаційної мережі і очисних споруд;
- температура стоків не повинна перевищувати 40 градусів, а показник рН повинен знаходитися в діапазоні між 6,5 і 9,0;
- не допускається наявність у стічних водах домішок, здатних призвести до засмічення решіток, труб і колодязів каналізації або виникнення на їх поверхні різних відкладень, такі як ґрунт, абразивні порошки, пісок, вапно, стружка металу або пластмаси, тверді відходи тощо;

- склад стічних вод не повинен викликати руйнування трубопроводів або елементів очисних споруд;
- у стоках не повинні міститися розчинені вибухонебезпечні та горючі гази і домішки, що речовини, які не піддаються біологічному розкладу, а також бактеріальні, вірусні, токсичні та радіоактивні забруднення;
- у стічних водах не повинні бути жорсткі схильні до руйнування поверхнево-активні речовини (ПАР);
- показник ГПК стоків не повинен перевищувати показник БПК₅ більше, ніж в 2,5 рази.

У разі, якщо стічні води підприємства не задовольняють одному або декільком перерахованим вище вимогам, то перед тим, як здійснити їх скидання в центральну каналізацію, на території підприємства здійснюється попереднє очищення стоків (наприклад, очищення стічних вод гальванічного виробництва), ступінь якої встановлюється шляхом погодження з міським муніципалітетом і спеціальними організаціями, які проектують очисні системи і каналізаційні установки даного населеного пункту.

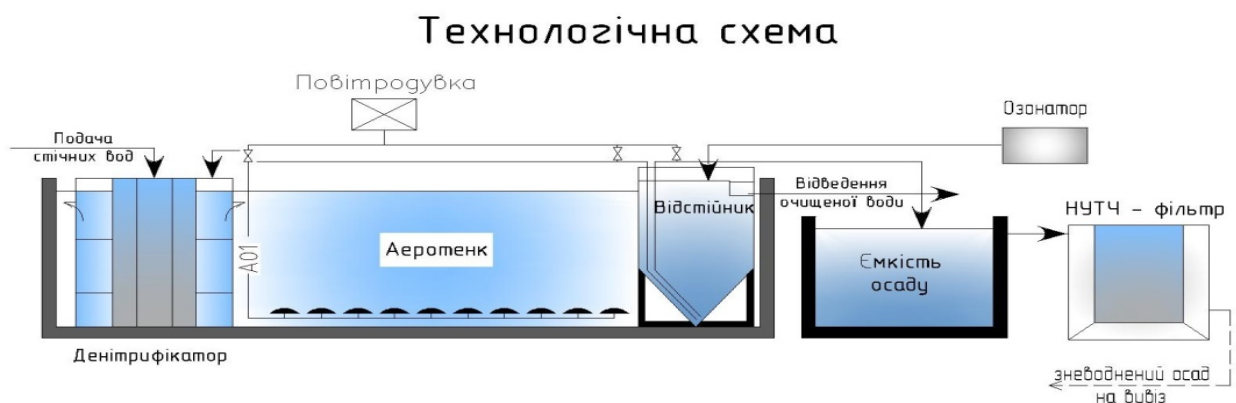
2.3 Біологічні методи, що застосовуються для очищення стоків промислових підприємств

Відповідаючи на питання про те, наскільки ефективна біологічна очистка стічних вод підприємств, не слід забувати, що в промислових стоках присутні речовини, що прискорюють біолого-хімічні процеси руйнування відходів, а також інші фактори, такі як:

- наявність в домішках токсичних речовин;
- структура домішок;
- підвищена мінералізація;
- рівень харчування біомаси;
- біогенні елементи;
- активна реакція середовища.

Отже, для успішної біологічної очистки стоків промислових підприємств, вони повинні відповідати наступним вимогам:

1. У стоках повинні бути присутніми домішки, що піддаються біохімічному руйнування, оскільки, в залежності від хімічної структури домішок, швидкість протікання біохімічних процесів може змінюватися.
Так, наприклад, первинні спирти набагато краще окислюються, ніж вторинні. Аерація стічних вод підвищує активність здійснюють очищення мікроорганізмів, що призводить до значного поліпшення якості очищення стоків.
2. Концентрація токсичних домішок у стічних водах (60 ГДК) не повинна чинити негативного впливу на режим роботи, в якому діє біологічна установка для очищення стічних води на перебіг в ній технологічних процесів.
3. Крім ГДК 60 слід також враховувати 6 ГДК, тобто гранично допустиму концентрацію таких токсичних речовин, які чинять негативний вплив на біохімічні процеси при набагато нижчій концентрації в стічних водах, викликаючи порушення процесів біологічного окислення відходів, так і процесів життєдіяльності очищують стоки мікроорганізмів.
- 4.



(<https://ziko.com.ua/organization-solution-biologichne-ochyshchennya-stichnykh-vod/>)

Рисунок 2.3. Технологічна схема очищення стічних вод

Ця комплексна система очищення виробничих стічних вод забезпечує зниження концентрації забруднень в середовищі до відповідних нормативним документам показників. Після очищення, воду можна використовувати для технічних потреб, скидати у водойми або ґрунт.

Система комплексного очищення промислових стоків складається з декількох блоків, що забезпечують максимальну очистку відпрацьованого середовища:

1. Денітріфікатор – одночасне окислення органічних речовин киснем, відновлення і видалення в атмосферу азоту.
2. Аеробний біореактор – штучна біологічна очистка промислових стічних вод аерацією і активними мулами.
3. Блок аерації – підтримка життєдіяльності мікроорганізмів активного мула.
4. Повітряпродувка – підтримання необхідного для ефективного функціонування системи тиску повітря.
5. Вторинний відстійник – доочищення і освітлення стічної води.
6. Озонатор – знезараження очищеного середовища озоном.
7. Дегідратор – зневоднення і утилізація осаду.

Застосовувана для очищення виробничих стічних вод технологія розроблена згідно з Технічними умовами ТУ У 42.2-38674771-008:201. Вона відповідає всім вимогам вітчизняних санітарно-гігієнічних норм.

Переваги комплексу:

- висока якість очищення стічних вод незалежно від вихідного складу середовища;
- спеціально розроблена запатентована технологія;
- безшумність роботи і відсутність сторонніх запахів;
- мінімальні фінансові витрати на експлуатацію та обслуговування;
- компактність

Дотримання всіх перерахованих вимог дозволяє промисловим підприємствам робити очищення та утилізацію стічних вод за допомогою як

власних очисних споруд, так і шляхом виведення в центральну каналізацію, не завдаючи при цьому шкоди навколишньому середовищу.

РОЗДІЛ 3

Біологічне очищення води. Вибір, характеристика, розрахунок споруд біологічного очищення стічних вод.

Зміст біологічного очищення води полягає у свідомому застосуванні гідробіонтів для звільнення води від небажаних домішок.

Гідробіонти – це мікроорганізми, представники тваринного і рослинного світу, які живуть у воді.

Досягнення мікробіології, гідробіології та біотехнології останніх десятиліть дають змогу стверджувати, що сучасні біологічні методи можна успішно використовувати для очищення води від усіх без винятку розчинених у ній органічних сполук у будь-яких концентраціях, від йонів важких металів, нітратів, сульфатів, хроматів, аміакатів та від небезпечних біологічних агентів (хвороботворних бактерій, вірусів тощо). Завдяки біологічному очищенню можна не лише знешкодити стічні води, а й відтворити якість води, використаної в промисловому виробництві, побуті, сільському господарстві чи забрудненої внаслідок техногенних аварій на водоймах. З огляду на його відносну дешевизну (а іноді й прибутковість), надійність та екологічну бездоганність біологічне очищення води має безсумнівну перспективу закріпити свою чільну роль в охороні водного басейну від забруднення.

Як і будь-яка інша біотехнологія, біологічні методи очищення води ґрунтуються на використанні тих чи інших живих істот, їхніх комплексів – біоценозів. Таких біоценозів в очищенні води нині відомо п'ять:

- 1) біоплівка;
- 2) активний мул;
- 3) анаеробні мікроорганізми, зокрема гранульований мул;
- 4) селекціоновані мікроорганізми – деструктори певних забруднень;
- 5) гідробіоценози, що становлять просторову сукцесію (біоконвеєр).

Саме ці біологічні угруповання є основою всіх існуючих біотехнологій очищення води: найрізноманітніших біофільтрів (з гравійним, піщаним чи синтетичним завантаженням; вертикальних чи новітніх – горизонтальних, що звуться "wetlands" – мочарами, занурених у воду, чи інтенсивно провітрюваних тощо); аеротенків, окситенків різних типів і калібрів (витискувачі, змішувачі, циркуляційні, шахтові, баштові тощо), бактеріальних біореакторів, низки анаеробних споруд з висхідним чи низхідним потоком, з рециркуляцією чи без неї; нарешті, прямотечійні мікробіо-, зоо- та фітореактори. Людина придумала силу-силенну технічних пристроїв, споруд, апаратів для біологічного очищення води, проте всі вони спираються на перелічені вище п'ять типів біологічних агентів, які споконвічне існують у природі.

3.1 Розрахунок первинного відстійника

Застосовуємо вертикальний первинний відстійник.

Діаметр відстійника:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{n k \eta (u_0 - w)}}$$

Q - максимальна витрата стічних вод, $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$.

n - кількість відділень, 8 шт.

k - коефіцієнт використання об'єму відстійника, 0,35.

u - умовна гідравлічна крупність, що відповідає заданому ефекту освітлення для реальних розмірів споруди, $0,17 \text{ мм/с}$.

w - вертикальна турбулентна складова, $w=0.05/v=0.05*0.86=0.0425$, де

v - швидкість руху води у зоні відстоювання, $0,85 \text{ мм/с}$.

$$D = \sqrt{\frac{4*0.08*100}{8*0.35*3.14*(0.17-0.0425)}} \text{ м.}$$

Час перебування води 90 хвилин.

Довжина центральної труби рівна розрахунковій глибині відстійної частини

$H_1=3,4$ м. Висота нейтрального шару між низом відображуючого щита і рівнем осаду – 0,3 м.

Діаметр центральної труби при швидкості в ній $v=0,03$ м/с.

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi kv}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.008}{8 \cdot 3.14 \cdot 0.03}} = 0.2$$

$$d_v = d \cdot 1.35 = 0.2 \cdot 1.35 = 0.27$$

Діаметр її раструба м.

Висота щілини H_2 між нижньою кромкою центральної труби і поверхнею відображуючого щита визначаємо з умови забезпечення в ній швидкості $v=0,002$ м/с.

$$H_2 = Q / \pi d_v v = 0.008 / (3.14 \cdot 0.27 \cdot 0.002) = 6 \text{ (м)}$$

У відповідності до нормативної літератури висота нейтрального шару між низом відображуючого щита і рівнем осаду $H_3=0,3$ м.

Тоді загальна висота циліндричної частини відстійника:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 = 3,4 + 6 + 0,3 + 0,5 = 10 \text{ м.}$$

$H_4=0,5$ м – висота борту відстійника.

Приймаємо кут нахилу стінок конусної частини до горизонту рівним 60° , тоді висота конусної частини

$$H_k = D * 0.5 / \sqrt{3} = 7 * 0.5 / \sqrt{3} = 2 \text{ (м)}$$

Загальна висота відстійника – 2+10=12 м.

Вміст зважених речовин понижується на 70%, тобто:

$$C = 150(1 - 0.7) = 45 \text{ мг/л}$$

Кількість осаду, що утвориться:

$$W = 500(150 - 45) / 10^6 = 0.05 \text{ т/добу}$$

-

3.2. Розрахунок аеротенку

Аеротенки застосовують для повної та неповної біологічної очистки стічних вод. Аеротенки представляють собою резервуари, де вода перемішується з активним мулом та повітрям і очищується. Концентрація зважених речовин задовольняє умовам (менше 150 мг/л).

Обираємо аеротенки-змішувачі, де вода подається розсосереджено, а забирається з оборотної сторони. Мул, що повертається, подається на початок.

Час перебування води у аеротенку:

$$t = (L_a - L_t) / a(1 - s)p$$

L_a – БПК стічних вод, 2400 мг/л, L_t – БПК очищеної води після першого ступеню очистки, 600 мг/л, a – доза мулу – 5 г/л, s – зольність мулу, 0,2, p – питома швидкість окислення, мг БПК на 1 г зольного мулу на годину, 85 мг/г*год.

$$t = (2400 - 600) / 5(1 - 0.2)85 = 6 \text{ год.}$$

Об'єм аеротенку:

$$V=t*Q(\text{м}^3/\text{год})=6*31,25=188 \text{ м}^3.$$

Питома витрата повітря:

$$q = \frac{q_0(L_a * L_t)}{K_1 K_2 K_3 (c_a * c_0)}$$

q_0 - питома витрата повітря 1 мг/мг.

K_1 – коефіцієнт, що ураховує тип аератора, 0,75 для середньопухирцевої аерації.

K_2 – коефіцієнт, що залежить від глибини занурення аераторів, на 6 м рівний 3,3.

K_T – коефіцієнт, що враховує температуру стічних вод, рівний 1

K_3 – коефіцієнт якості води, 0,85.

C_a – розчинність кисню у воді, 10 мг/л.

C_0 – вміст кисню у стічній воді, 2 мг/л.

$$q = \frac{1(2400*60)}{0.75*3.3*1*0.85(10*2)}$$

Площа аеротенку 31 м², довжина 8 м, ширина 4 м.

Після другої черги аеротенку БПК стане 5 мг/л, ХПК – 25 мг/л, зникнуть азот і фосфор, зважені речовини стануть 15 мг/л.

3.3. Розрахунок вторинного відстійника

Вторинні відстійники встановлюються для просвітління стічних вод, що пройшли біологічне та фізико-хімічне освітлення. Вторинні відстійники після біологічної очистки рекомендовано розраховувати за навантаженням, що визначається з виразу:

$$Q=nu_0$$

n – коефіцієнт використання об'єму зони відстоювання, для вертикальних відстійників рівний 0,35.

u_0 – гідравлічна крупність біоплівки, 1,4 мм/с.

$$q=0.35*1.4=0.49$$

Максимальна секундна витрата на очисну станцію:

$$Q_{\max}=Q/3600*16=500/3600*16=0,008 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приймаємо розрахункову висоту зони осадження $H_1=3$ м. Кількість секцій відстійника – 2 шт. Діаметр відстійника:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{nkr(u-w)}} = \sqrt{\frac{4*0.08*100}{8*0.35*3.14*1,4}} = 4 \text{ м}.$$

Діаметр центральної труби при швидкості води у ній 0,03 м/с:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{nkv}} = \sqrt{\frac{4*0.05}{2*3.14*0.03}} = 1 \text{ (м)}$$

Діаметр її раструба:

$$d_v = d * 135 = 0.4 * 135 = 0.54 \text{ (м)}$$

Висота щілини H_2 між нижньою кромкою центральної труби і поверхнею відображу вального щита визначаємо визначаємо із умови забезпечення в ній швидкості $v=0,02$ м/с.

У відповідності до нормативної літератури висота нейтрального шару між низом відображую чого щита і рівнем осаду $H_3=0,3$ м.

Тоді загальна висота циліндричної частини відстійника:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 + H_4 = 3 + 0,08 + 0,3 + 0,5 = 3,9 \text{ м.}$$

$H_4=0,5$ м – висота борту відстійника.

Приймаємо кут нахилу стінок конусної частини до горизонту рівним 60° , тоді висота конусної частини:

$$H_k = 1.2 \text{ (м)}$$

Загальна висота відстійника – $1,2+3,9=5,1$ м.

Вміст зважених речовин понижується на 90%, тобто:

$$C = 45(1-0,9) = 4,5 \text{ мг/л}$$

Кількість осаду, що утвориться:

$$W = 500(45 \cdot 4.5) / 10^6 = 0.02 \text{ (т/добу)}$$

3.4. Біфільтри

Біологічні фільтри є споруди, в яких процес біологічного очищення стічних вод протікає в штучно створених умовах. Біологічні фільтри бувають періодичного (контактні) і безперервної дії. Контактні біофільтри внаслідок їх малої пропускної спроможності і високої вартість в даний час не застосовують. Біофільтри безперервної дії по пропускній здатності можуть бути поділені на краплинні і високонавантажувані, за способом подачі в них

повітря та інші можуть бути з природною і з штучної вентиляцією (аерофільтри).

Краплинні біофільтри. Краплинні - безперервно діючі біофільтри в зарубіжній практиці іноді називають зрошувальними або перколяторними.

Постійно діючий крапельний біофільтр складається з наступних основних частин: непроникного підстави, дренажу, бічних стінок, фільтруючого матеріалу і розподільних пристроїв. Біофільтри, можуть бути в плані круглі, прямокутні, квадратні. Поверхня крапельного біофільтра зрошують зверху рівномірно через невеликі проміжки часу; . при цьому вода подається у вигляді крапель або струменів (краплинні або зрошувальні) або у вигляді тонкого шару води (перколяторніе).

У вітчизняній практиці в краплинні біофільтри повітря надходить природним шляхом - зверху через відкриту поверхню біофільтра і знизу через дренаж. Вони мають низькі навантаження по воді (не більше 0,5-1 м³ стічної води на 1 м³ завантажувального матеріалу), а також менший в порівнянні з високонавантажуваними біофільтрами розмір фракцій завантаження (20-40 мм).

Краплинні біофільтри рекомендується проектувати на пропускну здатність не більше 1000 м³ / добу. Вони призначені для повної біологічної очистки стічної рідини з БПК₂₀ очищеної води до 15 мг / л.

Проходячи через фільтруючу завантаження біофільтра, забруднена вода внаслідок адсорбції залишає в ній зважені і колоїдні органічні речовини, що не осіли в первинних відстійниках, які створюють біоплівку, густо заселену мікроорганізмами.

Мікроорганізми біоплівки окислюють органічні речовини і отримують необхідну для своєї життєдіяльності енергію. Частина розчинених органічних речовин мікроорганізми використовують як пластичний матеріал для збільшення своєї маси. Таким чином, зі стічної води віддаляються органічні речовини, а в тілі біофільтра збільшується маса активної біологічної плівки.

Відпрацьована і омертвевшая плівка змивається протікає стічною водою і виноситься з біофільтра.

Біофільтр (рис. 3.4) працює в такий спосіб. Освітлена в первинних відстійниках стічна вода самопливом (або під напором) надходить в розподільні пристрої, які періодично напускають воду на поверхню біофільтра. Профільтрована через товщу біофільтра вода проходить через отвори в дірчастому дні (дренажі), надходить на суцільне непроницаєме днище, з якого стікає по відвідним лотків, розташованим за межами біофільтра. Потім вода надходить у вторинні відстійники, в яких затримується виноситься біоплівка, відокремлена від очищеної стічної води. Ефект очищення нормально працюють біофільтрів подібного типу дуже високий і може досягає по БПК₂₀ 90% і більше.

При розрахунку біофільтра визначають необхідний обсяг завантажувального матеріалу для очищення надходить стічної води, а також розраховують розподільні пристрої для зрошення завантаження водою, дренаж і лотки, що збирають освітлену воду. У практиці проектування крапельних біофільтрів об'єм фільтруючого завантаження визначають по окислювальному потужності біофільтра. Окислювальна потужність-кількість грамів кисню, яке може бути отримано з 1 м³ завантажувального матеріалу в добу для зниження біохімічної потреби стічної води окислювальна потужність біофільтра коливається в широких межах, так як її величина залежить від багатьох факторів: температури стічної води і зовнішнього повітря, властивостей рідини, що поступає, матеріалу завантаження, способу подачі повітря та ін. Отриману розрахунком загальну площу біофільтрів ділять на окремі секції. Число і розміри секції біофільтрів залежать від способу розподілу стічної води по поверхні умов їх експлуатації та ін. Однак площа окремих секцій біофільтрів не повинна перевищувати 1000 м²

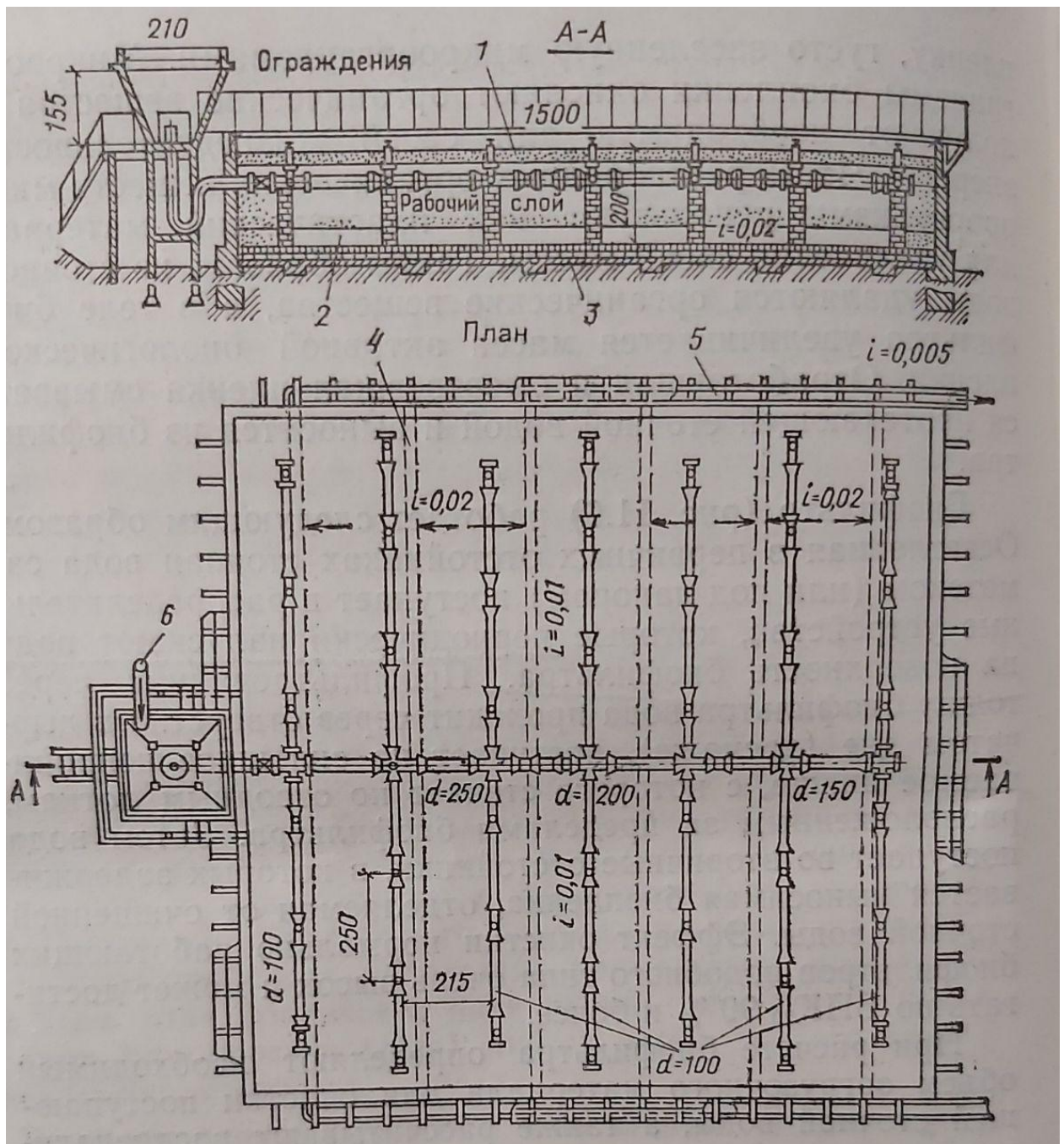


Рисунок 3.4. Біофільтр :

- 1- розподільний шар;
- 2- підтримуючий шар
- 3- бетон
- 4- дренаж
- 5- збірний лоток
- 6- подача стічної води.

Розрахунок крапельних біофільтрів виконують наступним чином:

1. Визначають коефіцієнт К:

$$K=L_a/L_t$$

де L_a и L_t БПК20 що надходить на біофільтр і очищеної стічної рідини, мг/л.

Зазвичай L_t приймається рівною 15 мг/л.

Гидравличес- кая нагрузка $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \times$ $\times \text{сут})$	Значения K при средней зимней температуре T воды, °C							
	8		10		12		14	
	при высоте биофильтра H , м							
	1,5	2	1,5	2	1,5	2	1,5	2
1	8	11,6	9,8	12,6	10,7	13,8	11,4	15,1
1,5	5,9	10,2	7	10,9	8,2	11,7	10	12,8
2	4,9	8,2	5,7	10	6,6	10,7	8	11,5
2,5	4,3	6,9	4,9	8,3	5,6	10,1	6,7	10,7
3	3,8	6	4,4	7,1	5	8,6	5,9	10,2

Рисунок 3.4.1. Таблиця значення коефіцієнта К для розрахунку капельних біофільтрів.

- По заданій середньої зимової температурі води T визначають K по даній таблиці коефіцієнта з рис.3.4.1 ,надано висоту біофільтра H , та гідравлічне навантаження $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{доб})$. Робочу висоту біофільтра H приймають 1,5-2м, а гідравлічне навантаження 1-3 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{доб})$. Якщо БПК20 надходить стічної води більше 220 мг / л, то вводиться рециркуляція. Знаючи розрахункову витрату стічної води $Q, \text{ м}^3/\text{доб}$, і гідравлічне навантаження $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{доб})$, визначають спільну площу біофільтрів, м^2

$$F=Q /q$$

3) збільшення (при необхідності) висоти фільтруючого завантаження.
до експлуатаційних особливостей відносяться:

- 1) обов'язкове зрошення всієї поверхні біофільтрів надходить водою і по можливості зменшення тривалості перерв в подачі води на поверхню
- 2) підвищення навантаження по воді на 1 м^2 поверхні з метою створення природних умов для мимовільної промивки фільтрів;

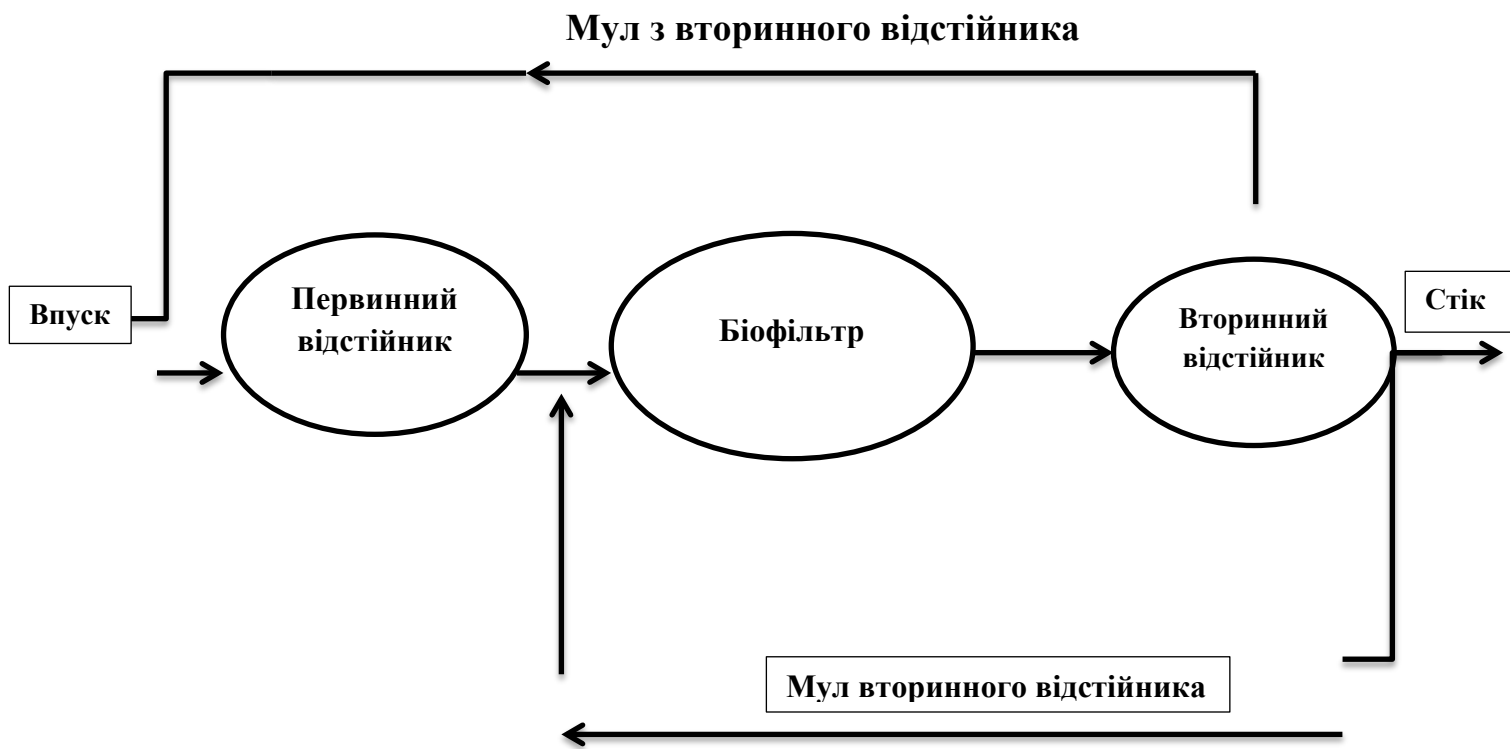


Рисунок 3.4.2. Схема одноступінчастої роботи біофільтрів з рециркуляцією.

3. По режиму роботи-з рециркуляцією і без рециркуляції. якщо концентрація

- одноступінчасті (рис. 3.4.2.) II двоступеневі. Двоступеневу роботу біофільтра передбачають в тому випадку, якщо необхідна повна біологічна очистка та біофільтри I ступені не можна запроектувати достатньої висоти. В цьому випадку в I ступені буде здійснюватися неповна очищення стоку, а в II ступені - його доочищення.

1) По висоті - низькі до 2 м, високі від 2 м і вище.

2) За конструктивними особливостями завантаження - з об'ємною завантаженням (гравій, щебінь, керамзит і ін.) I з площинною завантаженням.

Біофільтри з площинною завантаженням поділяються: з жорсткою завантаженням у вигляді кілець або обрізків труб з керамічних, пластмасових та металевих засипних елементів; з жорсткою завантаженням у вигляді решіток I.II блоків з плоских і гофрованих листів; з м'якої або рулонної завантаженням з металевих сіток пластмасових плівок, синтетичних тканин котторие крениться на каркасах або укладаються у вигляді рулонів. Високі біофільтри призначені для повної біологічної очистки, низькі - для часткової. Дослідження, проведені АКХ ім.К.Д. Памфілова (І.С. Постніков, В.В. Безен) і МІСД ім. Куйбишева (С.В. Яковлєв), дозволили розробити досить простий метод розрахунку біофільтрів високого завантаження.

РОЗДІЛ 4

Методи розрахунка біофільтра

В даний час у вітчизняній практиці використовується розрахунок біофільтрів по окислювальній потужності. За цим методом необхідний обсяг матеріалу завантаження № визначається за рівнянням

$$W = L_1 Q / OM,$$

де L_1 - БПК стічної води яка надходить , г/м³; Q - витрата стічних вод, м³/сут; OM - окислювальна потужність біофільтра, г/(м³-сут).

Окислювальна потужність 1 м³ завантаження біофільтра визначається в залежності від середньорічної температури повітря. К. Н. Корольков запропонував для розрахунку вилучення органічних забруднень користуватися закономірністю:

$$\frac{d L_t}{d t} = -k L_t,$$

допустивши, що маса органічних речовин, адсорбованих активним мулом, пропорційна концентрації їх у воді L_t в момент часу t (тут k - константа швидкості вилучення органічних забруднень).

Канд. техн. наук І. С. Постніков ввів в розрахункові рівняння висоту біофільтра H , що має велике значення для ефективного очищення стічних вод. Проф. С. В. Яковлєвим був запропонований графоаналитический Спосіб розрахунку високонагружаємих біофільтрів, в основу якого покладена функціональна залежність БСК5 виходить після очищення на біофільтрі води від ряду факторів:

$$L_2 = f (L_1, A, q, T, H, B_{уд}),$$

де L_2 - БСК5 виходять стічних вод, г / м³; L_1 - БСК5 стічних вод, г / м³;

A - концентрація зважених забруднень в стічних водах, що надходять на біофільтр, г / м³; q - гідравлічне навантаження, м³ / 1 (м²-добу);

T - температура стічної води, ° С; H -висота біофільтра (Тут і далі під висотою біофільтра H мається на увазі висота шару завантажувального матеріалу.), м; $V_{уд}$ - витрата повітря, м³ необхідний для аерації 1 м³ стічної води.

Обробивши численні вітчизняні та зарубіжні дані, С. В. Яковлев отримав критеріальну залежність (рис. 4.1, крива 1):

$$\mathcal{E} = f(\Phi_1),$$

де $E = 100L_2 / L_1$, $\Phi_1 = 10 \text{ НКТ} / q^{0.4}$ (тут Φ_1 - критеріальний комплекс; k_T - температурна константа).

Для визначення допустимої гідравлічного навантаження на фільтр при заданих значеннях L_1 , L_2 і H були отримані наступні формули:

при $L_1/L_2 \leq 10$

$$q = \left[\frac{H k_T}{0,19 \lg (L_1/L_2)} \right]^{2,5};$$

при $L_1/L_2 > 10$

$$q = \left[\frac{1,63 H k_T}{\lg (L_1/L_2) - 0,69} \right]^{2,5}.$$

Цей метод дозволяє розрахувати біофільтр на будь-яку ступінь очищення з урахуванням різних швидкостей окислення органічної речовини по висоті

завантаження. Надалі проф. С. В. Яковлевим і канд. техн: наук Е. П. Фазулліной були проведені лабораторні випробування по з'ясуванню впливу на очищення стічних вод обсягу повітря, що подається, крупності завантаження і рециркуляції. На основі проведених досліджень в критеріальний комплекс крім висоти біофільтра, температурного коефіцієнта і гідравлічного навантаження пропонувалося ввести обсяг повітря, що подається, який впливає на результат очищення.

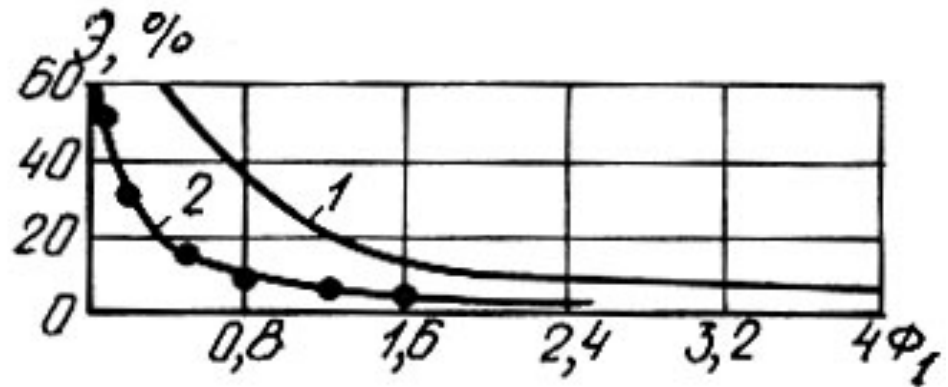
Витрата (повітря становить 8, 16 и 32 м³ на 1 м³ води). При цьому збільшення подачі повітря понад 16 м³ не дало подальшого поліпшення очищення води. Значення БПК вихідної води при витраті повітря 8 і 16 м³ було різним.

Цей метод дозволяє розрахувати біофільтр на будь-яку ступінь очищення з урахуванням різних швидкостей окислення органічної речовини по висоті завантаження.

Надалі проф. С. В. Яковлевим і канд. техн: наук Е. П. Фазулліной були проведені лабораторні випробування по з'ясуванню впливу на очищення стічних вод обсягу повітря, що подається, крупності завантаження і рециркуляції. На основі проведених досліджень в критеріальний комплекс крім висоти біофільтра, температурного коефіцієнта і гідравлічного навантаження пропонувалося ввести обсяг повітря, що подається, який впливає на результат очищення.

Витрата (повітря становив 8, 16 і 32 м³ на 1 м³ води. При цьому збільшення подачі повітря понад 16 м³ не дало подальшого поліпшення

очищення води. Значення БПК вихідної води при витраті повітря 8 і 16 м³



було різним.

Рисунок 4.1. Залежність $E = f(\Phi_{\text{sub1}} / \text{sub})$: 1 без урахування впливу повітря;

2 - при подачі повітря в обсязі 16 і 32 м³ / с на 1 м³ / с стічної води

При обробці дослідних даних в координатах $\epsilon = 100 L_1 / L_2$ і $\Phi_1 = 10 N_{k_T} / q^{0.4}$ були отримані дві криві (див. Рис. 4.1.). При цьому перша (при витраті повітря 8 м³ на 1 м³ стічної води) збіглася з кривою 1, отриманої без обліку витрати повітря.

З урахуванням витрати повітря $V_{\text{уд}}$, м³ на 1 м³ стічної води, критеріальний комплекс має вигляд

$$\Phi_2 = H^x B_{\text{уд}}^y k_T^z / q^z,$$

де x , y , z і z - параметри, що визначаються дослідним шляхом. В результаті обробки даних досліджень була рекомендована наступна формула для визначення параметрів біофільтрів:

$$\lg (L_1 / L_2) = \alpha H B_{\text{уд}}^{0.6} k_T / q^{0.4} + \beta,$$

де α і β - постійні коефіцієнти.

Критерійний комплекс, що характеризується виразом (8), придатний для гідравлічного навантаження, що дорівнює $1-30 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ і висоти біофільтра до 4 м. У компонентах критеріального комплексу можливі відхилення від знайдених значень показників ступеня при очищенні різних виробничих стічних вод. Дослідами встановлено, що закономірність очищення стічної води на біофільтрах при введенні рециркуляції не відрізняється від закономірності очищення її без рециркуляції. При наявності рециркуляції в вираженні (8) замість L_1 слід підставляти значення $L_{см}$ (БПК суміші вихідної і рециркулюємої стічної води). При загальній витраті стічних вод, що надходять на біофільтр, $(2, \text{м}^3/\text{сут}, \text{витрата води } (Q_{рец}, \text{м}^3/\text{сут}, \text{необхідної для розведення стічних вод, визначається з формули.}$

$$L_{см} = (L_1 Q + L_2 Q_{рец}) / (Q + Q_{рец}) .$$

Графоаналітичний метод виявився вельми гнучким і був покладений в основу розрахунку баштових біофільтрів, запропонованого канд. техн. наук Д. Ф. Харитоновим. Критерійний комплекс був представлений у вигляді

$$\Phi_3 = k_T H^{2/3} / q^{0,5} .$$

Проф. С. М. Шифрін і канд. тими: наук Ю. А. Феофанов вивчили можливість гідравлічного моделювання високонагружаємих біофільтрів. Оскільки біофільтри можуть класифікуватися як апарати зі стаціонарним шаром завантаження, то за своїми гідродинамічними властивостями вони займають проміжне положення між ідеальними витіснювачем і змішувачем. Отже, вони можуть бути представлені або моделлю ідеального витіснювача з перемішуванням рідини, або моделлю послідовно з'єднаних проточних ідеальних змішувачів, число яких в ланцюжку (а також тривалість перебування води в кожному змішувачі) залежить від висоти споруди і гідравлічного навантаження на біофільтр.

Математична модель високонагружаємих біофільтра з Урахуванням кінетики біохімічних реакцій для першого порядку швидкості вилучення забруднень із стічних вод має вигляд

$$L_2 = L_1 / (1 + k \tau_1)^{m_{\text{см}}},$$

де L_1 і L_2 - концентрація забруднень відповідно в надходить і очищеній воді; $T\tau_1$ - тривалість перебування води в одному змішувачі; $m_{\text{см}}$ - число змішувачів. Дані гідродинамічних досліджень дозволили отримати формулу для розрахунку високонагружаємих біофільтрів для очищення виробничих стічних вод молочних заводів:

$$L_1/L_2 = \left(1 + k \frac{q^{0,156}}{0,201H^{1,38}} \right)^{1,01H^{2,38}/q^{0,568}}$$

У зарубіжній практиці в основу розрахунків біофільтрів були покладені як емпіричні формули, так і формули, засновані на рівнянні мономолекулярної реакції. Після обробки на електронно-обчислювальній машині численних і власних даних (понад 300 джерел) Геллер і Готассом була отримана наступна формула:

$$L_2 = \frac{1,14 \cdot 10^{-2} N (Q L_1 + Q_{\text{рец}} L_2)^{1,19}}{(Q + Q_{\text{рец}})^{0,78} (0,3 + H)^{0,67} r^{0,25}},$$

$$N = \frac{4,66 (43\,560/\pi)^{0,13}}{Q^{0,28} T^{0,15}} = \frac{1,61}{Q^{0,28} T^{0,15}};$$

L_2 - БПК₅ очищених стічних вод, мг/л; L_1 - БПК₅ поступаючих стічних вод, мг/л; r - радіус біофільтра, м.

Найбільший вплив на L_2 надають L_1 и H (зі збільшенням H її вплив зменшується). Збільшення ($Q_{\text{рец}}$ з метою зменшення L_2 в межах до

$$Q_{\text{рец}} \leq 4Q.$$

При відсутності рециркуляції формула набирає вигляду

$$L_2 = \frac{0,18Q^{0,13} L_1^{1,19}}{(0,3 + H)^{0,67} r^{0,25} T^{0,15}}.$$

Аналіз (різних методів розрахунку високонагружаємих біофільтрів показує, що ефективність їх роботи залежить від гідравлічного навантаження, тривалості контакту стічної води з біоплівки і об'єму повітря, що надходить в тіло біофільтра.

Розглянемо трохи докладніше останню залежність. Оскільки обсяг повітря, що надходить в тіло біофільтра, визначається пористістю завантаження, то можна припустити, що чим більше порожнеч в тілі біофільтра, т. д. Що стоїть пористість завантажувального матеріалу, тим краще умови обтікання біоплівки повітрям. Приймавши крупність фракцій завантажувального матеріалу за умовний діаметр кульової фракції d , м, і розташували їх відповідно до схеми, наведеної на рис. 4.2, отримаємо, що загальне число куль на 1 м³ становить : $m_{\text{ш}} = 1/d^3$

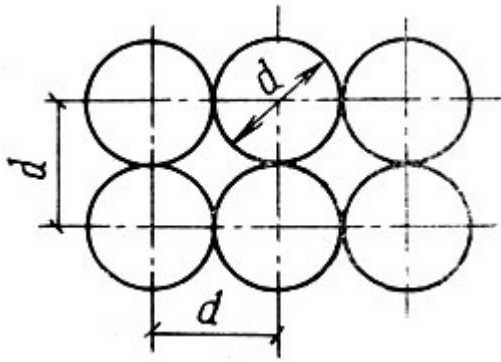


Рисунок 4.2. Розташування кругових фракцій в тілі біофільтра

Загальний обсяг, яку він обіймав кулями, складе (в частках одиниці):

$$W_{\text{ш}} = m_{\text{ш}} \pi d^3 / 6 = \pi / 6,$$

а площа поверхні куль, м^2 :

$$S_{\text{ш}} = m_{\text{ш}} \pi d^2 = \pi / d.$$

Таким чином, незалежно від крупності фракцій загальна пористість завантажувального матеріалу постійна і дорівнює $1 - \pi/6$, т. є. 48%.

Натурні виміри пористості завантажувального матеріалу показують, що вона дорівнює 50-52%, т.д. Досить близько збігається з пропонованою схемою підрахунку. Питомі площі поверхонь завантажувальних матеріалів практично не відрізняються від питомих площ поверхонь кульових фракцій відповідних діаметрів (рис. 4.4).

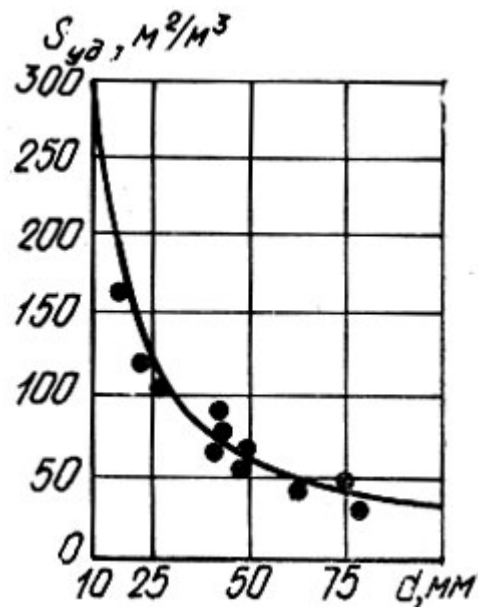


Рисунок 4.4. Залежність питомої площі поверхні завантаження від крупності завантаження [точки - дані натуральних вимірів об'ємної завантаження (щебінь, гравій, шлак, керамзит)]

Таким чином, пористість об'ємної завантаження будь-якого біофільтра невелика і не перевищує 50%. Підрахунки також показують, що допустима величина навантаження по органічним забрудненням при забезпеченні повного очищення на біофільтрах з об'ємною завантаженням (крапельних, високонагружаємих і баштових) знаходиться також в прямій лінійній залежності від крупності пір в тілі біофільтра (рис. 4.5).

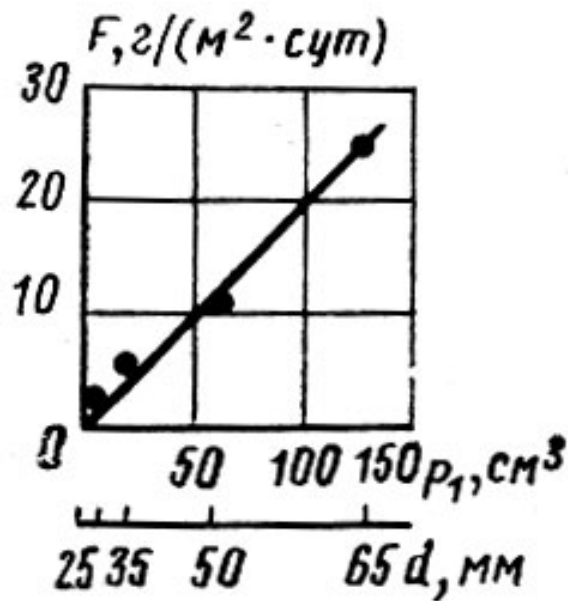


Рисунок 4.5. Залежність величини органічної навантаження по БПК_{sub5} / _{sub} від обсягу одиничної пори

Прийнявши навантаження по БПК на біофільтр $M = L_1 q_p$ [де L_1 -БПК поступаючих стічних вод, г/м³; q_p - гідравлічне навантаження, м³/(м³-сут)]. і віднісши її до питомої площі поверхні завантаження S_{yd} , маємо

$$F = M / S_{yd},$$

В той час:

$$F = 0,2 \operatorname{tg} \alpha p_1,$$

де 0,2 - масштабний коефіцієнт; $\operatorname{tg} \alpha = 0,96$; p_1 - об'єм одиничної пори, см³, рівний p/m_p (де m_p - число пор в 1 м³; p - загальний обсяг пустот, см³).

Так як $p = (1 - \pi/6) 10^6$, а $S_{yd} = \pi/d$, то $M/S_{yd} = 0,192 p/m_p$;

$$M = 0,192 S_{yd} p/m_p = 0,192 \frac{\pi}{d} \frac{(1 - \pi/6) 10^6}{1/d^3} = 0,192 \cdot 1,44 \cdot 10^3 d^2.$$

Якщо діаметр фракції d висловити в см, отримаємо:

$$M = 27,6 d^2,$$

де $d=2,5 \div 6,5$ см.

Наведені міркування і підрахунки переконливо показують, що підвищення продуктивності біофільтрів слід шукати в збільшенні діаметра фракцій завантаження і її пористості. Але зі збільшенням крупності фракцій завантажувального матеріалу зменшується площа робочої поверхні для утворення біоплівки. Тому для підвищення продуктивності біофільтрів слід йти по шляху збільшення пористості завантаження.

У дослідях, проведених на кафедрі каналізації МІСД ім. В. В. Куйбишева, пористість біофільтрів з (площинний завантаженням становила 73-99%. У цьому, зокрема, і вбачається основна принципова відмінність біофільтрів з площинною завантаженням від біофільтрів з об'ємною завантаженням.

Авторами був запропонований метод розрахунку -біофільтров з площинною завантаженням, який полягає в наступному.

Відомо, що L_2 (БСК5 очищеної стічної води) є функцією наступних величин:

$$L_2 = f (L_1, q_n, S_{уд}, T, H, B_{уд}, P),$$

где L_1 - БПК поступаючої стічної води , мг/л; q_n - гідравлічне навантаження, $m^3/(m^3\cdot сут)$; P - пористість завантажувального матеріалу, %,

Так як у біофільтрів з площинною завантаженням аерація здійснюється природним шляхом і можна вважати, що повітря подається цілком достатньо то функціональну залежність можна записати у вигляді:

$$L_2 = f (F, T, H, P),$$

де Р- маса органічних забруднень по БСК5 надходять на добу на одиницю площі поверхні завантажувального матеріалу біофільтра, г / (м²-добу):

$$F = L_1 q_{\text{п}} / S_{\text{уд}} = M / S_{\text{уд}}.$$

РОЗДІЛ 5

Аеротенки

Аеротенк сконструйований у вигляді резервуара, в якому перетікають стічні води, суміщені з активним муловим осадом. В аеротенках протікає біохімічний очисної процес стоків - Аерація. У станцію здійснюється подача кисню, за допомогою пневмоаераторов, або механічних аераторів - вдаючи із себе аераційну систему. Повітря подається під тиском розмішує стоки з активним муловим осадом і насичує цю суміш нечистот киснем. Ця Аерація потрібно для активної життєдіяльності спеціальних бактерій прискорюючи процес їх розкладання.

А)



(<https://delfin.one/aerotenk/>)

Б)



(<https://delfin.one/aerotenk/>)

Рисунок 5.1 а),б) Аеротенк

Аеротенки різних типів застосовуються для біологічного очищення міських і виробничих стічних вод. За структурою потоку всі типи аеротенків діляться на аеротенки-витискувачі, аеротенки-змішувачі, аеротенки-відстійники. Концентрація зважених речовин у воді, яка подається на

аеротенки (після первинних відстійників) повинна бути не більше 150 мг / л. Аеротенки-відстійники застосовуються при пропускній спроможності станції до 50000 м³ / добу; аеротенки-змішувачі різних модифікацій застосовуються при значеннях БПК_{полн} очистки стоку понад 500 мг / л, при наявності в стоці повільно окисляються, а також при коливаннях складу стічних вод; аеротенки-витискувачі - при БПК_{полн} очищуемого стоку до 150 мг / л і при відсутності залпових надходжень токсичних речовин. При значеннях БПК_{полн}, що перевищують 150 мг / л, необхідно передбачати регенерацію активного мулу.

Розрахунок аеротенків включає визначення ємності і габаритних розмірів споруди, обсягу необхідного повітря і надлишкового активного мулу. Вмістимість аеротенках визначається по середньогодинної надходженню води за період аерації в години максимального припливу. При проектуванні аеротенків визначається період аерації в залежності від принципу їх роботи і наявності регенерації активного мулу.

РОЗДІЛ 6

Експериментальне дослідження біологічної очистки води

Експериментальне дослідження біологічної очистки води проводилось в лабораторії на кафедрі гідравліки та водопостачання університету та фірми «Енергосервіс-КР». Вид експериментального устаткування показано на рис.6.1.,6.2.

Експериментальне дослідження проводилось в літку 2020 року. Експерименті почались 2.06.2020 р. та закінчились 26.06.2020 р. Це було пов'язано з тим, що в процесі експерименту температура стічних вод не повинна змінюватися в широкому діапазоні. При проведенні досліджень температура стічних вод змінювалась в діапазоні 22-24 С⁰. В біореактор була подана забруднена вода в кількості 10 л. БПК₅ цієї води було 172 (мг/л). В біореактор був подан активний мул. Концентрація активного мула була 30 мг/л, та визначали ступінь забруднення та концентрацію активного мулу. Ці данні наведені в табл. 6.1



Рисунок 6.1 Вид экспериментальной установки



Рисунок 6.2 Вид зверху експериментального обладнання

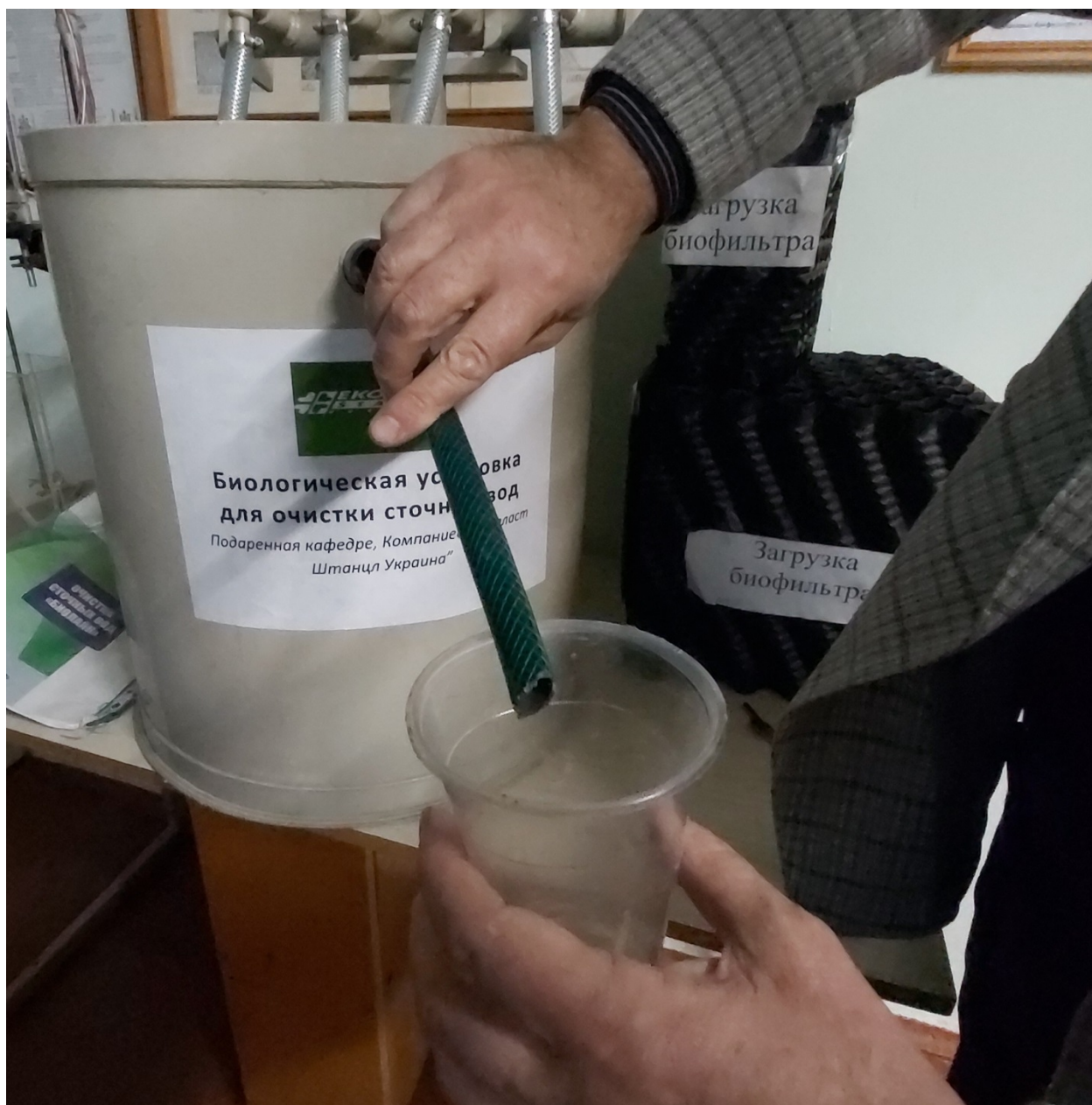


Рисунок 6.3 Проведення експериментальних досліджень

При проведенні експерименту кожні 5 діб ми брали пробу стічних вод в біореакторі. Дані заносились в таблицю.

Таблиця 6.1. Експериментальне значення концентрації субстрату, та активного мулу в біореакторі (перший експеримент).

Час, діб	Концентрація субстрату, мг\л	Концентрація активного мулу, мг\л
5	161	37
10	148	42
15	136	57

Експеримент був продовжений в вересні 2020 року. Експеримент проводився з 01.09.2020р. - 25.09.2020р. цей експеримент проводився при іншій концентрації активного мулу в біореакторі – 45 мг\л. При проведенні експерименту середня температура повітря була 19-21 С⁰.

Таблиця 6.2. Експериментальне значення концентрації субстрату, та активного мулу в біореакторі (другий експеримент).

Час, діб	Концентрація субстрату, мг\л	Концентрація активного мулу, мг\л
5	146	62
10	124	93
15	83	127

Якщо ми порівнюємо експериментальні дані, що наведені в таблицях, то можна зробити наступний висновок: Збільшення концентрації активного мулу приводить до підвищення якості очистки стічних вод.

РОЗДІЛ 7

Матиматичне моделювання біологічної очистки води

На другому етапі досліджень була побудована математична модель, для біореактору, що розташований на Лівобережній станції аерації м. Дніпро. Під час побудови моделі будемо враховувати такі фактори:

- геометричну форму аеротенка;
- процес зміни концентрації субстрату в аеротенке з часом;
- процес зміни концентрації активного мулу в аеротенке з часом;
- наявність додаткових елементів в аеротенке.

Рівняння матеріального балансу для субстрату та активного мулу в реакторі, з урахуванням моделі Monod мають вигляд :

$$\frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial uX}{\partial x} + \frac{\partial vX}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial X}{\partial y} \right) = 0 \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) = 0 \quad (7.2)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - K_d X \quad (7.3)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\mu}{Y} X \quad (7.4)$$

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s} \quad (7.5)$$

де K_d - коефіцієнт вимірювання активного мулу; t - час; X - осредненная концентрація активного мулу в біореакторі; S - осредненная концентрація субстрату в біореакторі; μ - параметр; Y - параметр; u, v - компоненти

швидкості водного потоку в біореакторі, в напрямку вісей x , y відповідно;
 $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ - коефіцієнти дифузії відповідно у напрямку x , y ; t час.

Оседнення концентрацій активного мулу та субстрату по ширині B біореактору виконується так

$$X(x, z) = \frac{1}{B} \int X(x, y, z) dy$$

$$S(x, z) = \frac{1}{B} \int S(x, y, z) dy$$

Рівняння (7.1) і (7.2) описують зміну концентрації активного мулу та субстрату з часом в аеротенке рахунок руху та дифузії. Рівняння (7.3) - (7.5) описують процес споживання субстрату активним мулом.

Граничні умови для моделюючих рівнянь такі:

1. на входному отворі граничною умовою є $S = S_{in}, X = X_{in}$

де S_{in}, X_{in} відомі концентрації субстрату та мулу відповідно.

3. на виході з біореактору, в чисельної моделі, гранична умова така

$$S(i+1, j) = S(i, j)$$

$$X(i+1, j) = X(i, j)$$

де $S(i+1, j), X(i+1, j)$ концентрації в останній обчислювальній комірці;
 $S(i, j), X(i, j)$ - це концентрації в попередній обчислювальній комірці.

3. на твердих поверхнях

$$\frac{\partial X}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0$$

де n - одинична нормаль то доверхні.

Початкові умови мають вигляд

при $t=0$: $X=X_0$, $S=S_0$

Для вирішення задачі гідродинамики – визначення поля компонент вектора швидкості течії в аеротенке використовується модель потенціального руху :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (7.6)$$

де P – потенціал швидкості.

Знаючи поле потенціалу, значення компонент вектора швидкості потоку в біореакторі визначається за формулами :

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}$$

Розглянемо різницеві залежності за допомогою яких здійснюється чисельне інтегрування моделюючих рівнянь. Так, для розрахунку концентрації субстрату в біореакторі використовується змінно - трикутна двукрокова схема розщеплення . На першому кроці розщеплення, розрахункова залежність має вигляд

$$S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} = S_{ij}^n - Vt \frac{u_{i+1,j}^+ S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - u_{ij}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{Vx} +$$

$$+ Vt \mu \frac{-S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2Vx^2} + Vt \mu \frac{-S_{ij}^n + S_{i+1,j}^n}{2Vx^2}$$

(7.7)

На другому кроці розщеплення , розрахункова залежність така:

$$\begin{aligned}
S_{ij}^{n+1} = & S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - Vt \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- S_{ij}^{n+1}}{Vx} + \\
& + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2Vx^2} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2Vx^2}
\end{aligned}
\tag{7.8}$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}.$$

Для другого рівняння різниці схеми мають вигляд:
на першому кроці, розрахункова залежність має вигляд

$$\begin{aligned}
S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} = & S_{ij}^n - Vt \frac{v_{ij+1}^+ S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - v_{ij}^+ S_{ij-1}^{n+\frac{1}{2}}}{Vy} + \\
& + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + S_{ij-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2Vy^2} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^n + S_{ij+1}^n}{2Vy^2}
\end{aligned}
\tag{7.9}$$

На другому кроці, розрахункова залежність така:

$$\begin{aligned}
S_{ij}^{n+1} = & S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - Vt \frac{v_{ij+1}^- S_{ij+1}^{n+1} - v_{ij}^- S_{ij}^{n+1}}{Vy} + \\
& + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2Vy^2} + Vt\mu \frac{-S_{ij}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2Vy^2}
\end{aligned}
\tag{7.10}$$

$$\text{де } v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}$$

Для побудови локально одновимірної схеми рішення рівняння (7.6) здійснюємо наступні перетворення. Перше, представимо це рівняння у вигляді

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (7.11)$$

де t - фіктивний час.

Далі, рівняння розщеплемо так

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (7.12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (7.13)$$

Рівняння (7.12) описує зміну величини P в напрямку вісі X , а рівняння (7.13) – зміна в напрямку Y .

Розрахункові залежності (метод Річардсона) для визначення невідомого значення P на базі рівняння (7.12) мають вигляд:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} \quad (7.14)$$

Розрахункові залежності (метод Річардсона) для визначення невідомого значення P на базі рівняння (7.13) мають вигляд:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \quad (7.15)$$

Так як ми вирішуємо еволюційне рівняння, то розрахунок за залежностями

(7.14), (7.15) закінчується коли виконується умова:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Швидкість течії розраховується так

$$u = \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x}$$

$$v = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y}$$

Для чисельного інтегрування рівнянь (7.3), (7.4) використовується метод Ейлера .

Алгоритм рішення задачі включає два головних етапа:

Перший етап включає такі шаги:

1.1. Розраховується поле потенціала швидкості $P(x,y)$ в аеротенку.

1.2. Визначається поле швидкості потоку $u(x,y)$, $v(x,y)$ в аеротенку.

Другий етап (розрахунок на часовому кроці dt) включає такі шаги:

2.1. розраховується зміна концентрації активного мулу в аеротенку за рахунок руху потоку та дифузії;

2.2. розраховується зміна концентрації субстрату в аеротенку за рахунок руху потоку та дифузії;

2.3. розраховується зміна концентрації активного мулу та субстрату, в кожній різницевої комірці, на базі моделі Monod;

2.4 розрахунок повторюється на новому часовому кроці починаючи з п.2.1.

На базі побудованої чисельної моделі була розроблена комп'ютерна програма «*BIO-2K*». Программування виконано на алгоритмічній мові FORTRAN.

Результати

Нижче наведені результати рішення задачі по оцінці ефективності роботи аеротенка за допомогою розробленої CFD моделі. Розглядалися такі сценарій: аеротенк працює без додаткових елементів всередині споруди.

Розрахунки виконувалися при наступних вхідних даних:

$S_{in} = 360$ мг/л- концентрація субстрату (БПК_{пов}), що потрапляє в споруду;

розміри біореактору 15м*5м;

$Q_s(t) = 3495$ м³/доб – витрата стічних вод;

$\mu_x = \mu_y = 2 \cdot 10^{-4}$ м²/доб.

$X_{in} = 200$ мг/л - - концентрація активного мулу, що потрапляє в реактор.

$$\mu_{\max} = 1.04 \text{ - параметр.}$$
$$K_s = 100 \text{ мг/л} - \text{параметр}$$

$K_d = 0.055$ 1/доб – коефіцієнт, що враховує загібель мікрорганізмів.

$Y = 0.55$ - параметр.

Початкова умова: $S_{in} = 360$ мг/л, $X_{in} = 200$ мг/л, - концентрація субстрату та активного мулу в реакторі для моменту часу $t=0$.

На рис. 7.1 показана концентрація субстрату на виході з реактору для сценаріїв, що розглядається. Концентрація є осередненою по ширині аеротенку для моменту часу $t=1.5$ (час – безрозмірний). Кожне число на приведених рисунках показує концентрацію субстрату у відсотках від максимальної концентрації (це концентрація на вході в реактор $S_{in} = 360$ мг/л).

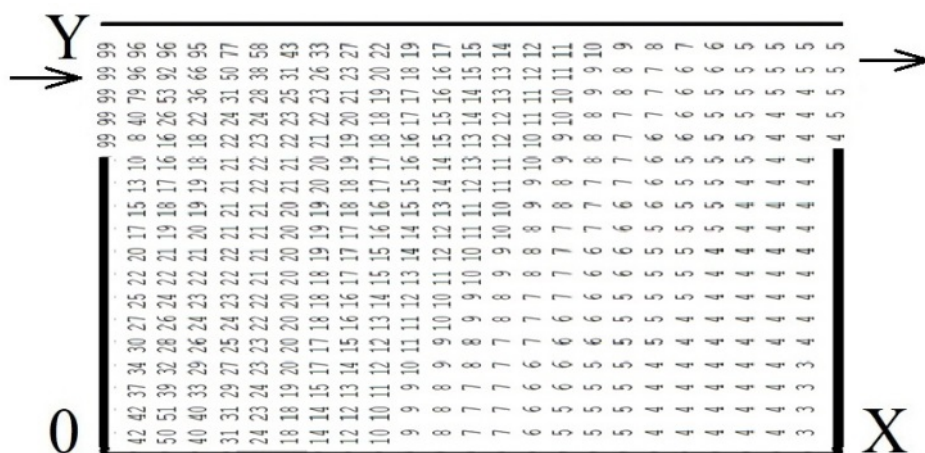


Рисунок 7.1 - Концентрація субстрату вбіореакторі
(нема пластин)

Ми бачимо, що на виході з біореактору концентрація субстрату дорівнює 5% від концентрації на вході в реактор.

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз існуючих методів для очистки води .
2. Проведено лабораторне дослідження ефективності роботи роботи біореактору при різній навантаженні .
3. Лабораторні дослідження показали, що при збільшенні концентрації активного мулу в біореакторі поліпшується якість очистки стічних вод.
4. За допомогою спеціалізованого комп'ютерного пакету програм проведено обчислювальний експеримент по оцінці ефективності роботи біореактору , що працює в режимі «box modle».
5. На основі проведеного обчислювального експерименту встановлена ефективність роботи біореактору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алферова Л.А., Нечасв А.П. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов. – М.:Стройиздат, 1984. – 272 с.
2. Белан А.Е. Технология водоснабжения. – К.: Наукова думка, 1985. – 263 с.
3. Беліченко Ю.П., Дращнер Б.М., Чередніченко В.М. Захист водних ресурсів. – К.: «Будівельник», 1990. – 94 с.
4. Белов С.В., Варбинов Ф.А., Козьяков А.Ф. и др. Охрана окружающей среды. – М.: «Высшая школа», 1991. – 318 с.
5. Василенко Л.И., Василенко А.А. Проектирование канализации населенных мест. – К.: «Будівельник», 1985. – 135 с.
6. Білецький А.А. Організація і технологія будівельних робіт: навч. посіб. для студ. напряму "Водні ресурси" вищ. навч. закл.. — Рівне : НУВГП, 2007. — 202с.
7. Веселов Ю.С., Лавров И.С., Рукобратский Н.И. Водоочистное оборудование. – Л.: «Машиностроение», 1985. – 230 с.
8. Гребенюк В.Д. Электродиализ. – К.: «Техніка», 1976. – 160 с.
9. Дуганов Г.В., Лавриненко М.З. и др. Охрана окружающей природной среды. – К.: «Вища школа», 1988. – 304 с.
10. Журба М.Г. Очистка воды на зернистых фильтрах. – Львов: «Вища школа», 1980. – 195 с.
11. Зацепин В.Н., Шигорин Г.П., Зацепина М.В. Канализация. – Л.: Стройиздат, 1976. – 272 с.
12. Калищун В.И. Основы водоснабжения и канализации. – М.: Стройиздат, 1977. – 206 с.
13. Кирилюк М.І. Водний баланс і якісний стан водних ресурсів Українських Карпат: Навч. посібник / Чернівецький національний ун-т ім. Юрія Федьковича. — Чернівці : Рута, 2008. — 246с.

14. Костюк В.И., Карнаух Г.С. Очистка сточных вод машиностроительных предприятий. – К.: «Техника», 1990. – 120с.
15. Лантев И.П. Теоретические основы охраны природы. – Томск: Унивирситет, 1975. – 275 с.
16. Ласков Ю.М., Воронов Ю.В., Калицун В.И. Примеры расчета канализационных сооружений. – М.: Стройиздат, 1987. – 275 с.
17. Луценко Г.А., Цветкова А.И., Свердлов И.Ш. Физико-химическая очистка городских сточных вод. – М.: Стройиздат, 1984. – 88 с.
18. Мацнев А.И. Водоотведение на промышленных предприятиях. – Львов: «Вища школа», 1986. – 198 с.

17. Поляков В.Л. О гидравлике водоочисных безнапорных фильтров на начальных стадиях фильтрования / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.:КНУБА,2015.- Вип.25.- С.223-231.
18. Кравчук О.А. До зміни гідравлічних характеристик зернистого завантаження фільтрів в процесі їх роботи // Науковий вісник будівництва .- Харків :ХНУБА,2016.-Вип. №2 (84).- С.316-319.
19. Кравчук О.А. Дослідження гідравлічного опору завантаження фільтрів// Проблеми водопостачання ,водовідведення та гідравліки К.:КНУБА,2016.- Вип.27.-С.208-213.
20. Кравчук О.А. До розрахунку дії параметрів швидкого фільтру при істотній зміні швидкості фільтрування // Містобудування та територіальне панування К.:КНУБА,2017.- Вип.63.-С.215-221.
21. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження зміни швидкості фільтрування під час роботи швидкого фільтра // Містобудування та територіальне панування К.:КНУБА,2017.- Вип.64.-С135-141.
22. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження втрат напору під час роботи швидкого фільтра зі змінною з часом швидкістю фільтрування //

Гірничі,будівельні,дорожні та меліоративні машини. Містобудування та територіальне панування К.:КНУБА,2017.- Вип.89.-С.56-62.

- 23.Экологически чистые подземные питьевые воды (минеральные природные столовые). Рекомендации по обоснованию перспективных участков для добычи с целью промышленного розлива. - М.: ГИДЭК, 1998.-32 с.
24. ДсанПіН. Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання. - Затв. наказом МОЗ України № 383 від 23.12.1996 р.
25. Кульский Л.А. Основы химии и технологии воды. - К.: Наукова думка, 1991.- 348 с.
26. Колотило В.Д., Намяк Д.С. Технології кондиціонування питної води. - Х.: Основа, 2006. - 208 с.
27. Бабенков Е.Д. Очистка воды коагулянтами. - М: Наука. 1977.-356 с.
28. Душкин, С.С. Разработка научных основ ресурсосберегающих технологий подготовки экологически чистой питьевой воды / С.С. Душкин, Г.И. Благодарная. – Харьков: ХНАГХ, 2009. – 95 с.
29. Епоян, С.М. До розрахунку горизонтального відстійника з пористою полімербетонною перегородкою систем господарсько-питного водопостачання / С.М. Епоян, Д.Г. Сухоруков // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – 2012. – Вип. 68. – С. 244-248.
30. Епоян, С.М. Особливості роботи пористої полімербетонної перегородки водопровідного горизонтального відстійника і її регенерація / С.М. Епоян, Д.Г. Сухоруков // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – 2012. – Вип. 69. – С. 327-331.
31. Закон України «Про Загальнодержавну цільову програму «Питна вода України» на 2006-2020 роки»: офіц. текст прийнятий Верх. Радою України 3 березня 2005 р.: із змінами та доп. станом на 13 листопада 2011 р. / Офіційний веб-сайт Верховної Ради України. – Режим доступа к информации: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2455-15/paran15#n15> 9.

32. Канализация / С.В. Яковлев, Я.Л. Карелии, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – [5-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Стройиздат, 1975. – 632 с.
33. Карагяур, А.С. Дослідження впливу конструктивних параметрів контактної камери на ефективність перемішування озону з водою / А.С. Карагяур // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. – Вип. 47. – С. 241-244.
34. Карагяур, А.С. Тонкослойный отстойник с усовершенствованными устройствами подвода-отвода воды / А.С. Карагяур, А.А. Сыроватский, С.П. Бабенко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – Вип. 65. – С. 349-353.
35. Карелин Я.А., Жуков Д.Д., Журов В.Н., Репин Б.Н. Очистка производственных сточных вод в аэротенках. М., Стройиздат, 1973, 223с.
36. Кичигин, В.И. Моделирование процессов очистки воды / В.И. Кичигин. Учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 230 с.
37. Ковальчук, В.А. Очистка стічних вод / Ковальчук В.А. Навчальний посібник. – Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», 2002. – 622 с.
38. Козачек А.В., Авдашин И.М., Лузгачев В.А. Исследование математической модели процесса аэробной очистки сточных вод как стадия оценки качества окружающей среды // Вестник ТГУ, т.19, вып.5, 2014. С.1683 – 1685.
39. Козачина, В.А. Моделирование процесса массопереноса в отстойнике при импульсной подаче примеси / В.А. Козачина // Науковий вісник будівництва. – ХНУБА, 2015. – №1 (79) – С. 162-165.
40. Колесник В.П., Вильсон В.Е. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях. Ростов – на – Дону, Изд-во «Юг», 2005. 212с.
41. Корінько, І.В. Інноваційні технології водопідготовки / І.В. Корінько, Ю.О. Панасенко. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 208 с.
42. Логачев, И. Н. Аэродинамические основы аспирации / И.Н. Логачев, К. И. Логачев – Санкт-Петербург: Химиздат, 2005. – 659 с.

- 43.Ласков Ю.М., Воронов Ю.В., Калицун В.И. Примеры расчетов канализационных сооружений. / М.: Высшая школа, 1981. -237с.
- 44.Лемеш М.В., Біляєв М.М., Татарко Л.Г., Якубовська З.М. Моделювання процесу очищення стічних вод на базі камерних моделей// Наука та прогрес транспорту. – 2020. – № 3 (87). – С. 16–24.
- 45.Лемеш М.В., Козачина В.А., Гончаров В.В., Поляков А.А., Рекунович А.С. Повышение эффективности очистки сточных вод – как инструмент защиты водоемов от загрязнения // Науковий симпозіум «Тиждень еколога -2019», 7 - 10 жовтня, 2019, Кам'янське, ДДТУ. – С.110 -111с
- 46.[Лойцянский, Л.Г.](#) Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
- 47.Метод численного решения уравнений течения вязкой жидкости в переменных скорость-давление / Е.В. Бруяцкий, А.Г. Костин, Е.И. Никифорович, Н.В. Розумнюк // Прикладна гідромеханіка. Науковий журнал. – К.: Інститут гідромеханіки НАН України, 2008 – Т. 10, № 2 – С. 13-23.
- 48.Методика инженерного расчета вторичных вертикальных отстойников / [А. Я. Олейник, С. К. Киселев, В. Ф. Малько, О. Н. Ягодковская] // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. Науково-технічний збірник. – К.:КНУБА, 2006. – №7. – С. 65-82.
- 49.Олейник, А. Я. Расчеты аэротенка-смесителя вместе с вертикальным вторичным отстойником / А.Я. Олейник, О.М. Ягодковская, Г.С. Маслун// Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. Науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 2009. – №13. – С. 49-62.
- 50.Олійник О.Я., Айрапетян Т.С. Теорія і розрахунки біологічної очистки стічних вод в аеротенках з ізваженим (вільноплаваючим) і закріпленим надодатковими пристроями біоценозом / Прикладна гідромеханіка. 2015. Том 17, N 3. С. 35 – 43
- 51.Олійник, О.Я. Особливості моделювання очистки стічних вод у системі аеротенк-відстійник-регенератор / О. Я. Олійник, С. В. Зябліков // Проблемы

- водопостачання, водовідведення та гідравліки. Науково-технічний збірник. – К.:КНУБА, 2006. – №7. – С. 65-82.
52. Олійник О.Я., Колпакова О. А. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах // [Екологічна безпека та природокористування](#). - 2014. - Вип. 16. - С. 68-86.
53. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды [монографія] / [С.М. Эпоян, Г.И. Благодарная, С.С. Душкин, В.А. Сташук]. – Харьков: ХНАГХ, 2013. – 190 с.
54. Поляков, В.Л. Моделирование биофильтрации воды с ограниченным содержанием органического субстрата. Биореактор-фильтр / В.Л. Поляков // Доповіді НАН України. Науково-теоретичний журнал Президії Національної академії наук України. – К.: НАН України, 2011. – № 7. – С. 58-66.
55. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения / [А.А. Василенко, П.А. Грабовский, Г.М. Ларкин и др.]. – Киев - Одесса: КНУСА, ОГАСА, 2007. – 307 с.
56. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
57. Саблій Л. А. Моделювання процесів очищення стічних вод в біореакторах з іммобілізованими мікроорганізмами // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Випуск 4(56), 2011. с. 83 -90.