

ЗАЯВА

Я, Победьонний Руслан Павлович
(ПІБ повністю)
Студент групи ВВ2021
(шифр групи)
Спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія
(код та назва спеціальності)
освітньої програми Водопостачання та водовідведення
(наша освітньої програми)

освітнього ступеня підготовки **магістр**

заявляю, що моя випускна кваліфікаційна робота на тему:

Моделювання біологічної очистки води на рибній фермі

виконана самостійно і в ній не міститься елементів плагіату. Всі запозичення з друкованих та електронних джерел мають відповідні посилання.

Прошу перевірити її на наявність академічного плагіату.

Я ознайомена з чинним «Порядком перевірки кваліфікаційних випускних робіт здобувачів вищої освіти на виявлення текстових та графічних запозичень засобами перевірки на плагіат», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску випускної кваліфікаційної роботи до захисту.

Дата
Керівник
проф. Біляєв М.М.

Підпис
Підпис



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Гідравліка та водопостачання»

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

(підпис)
(ПБ)

20 ____ р. ____ « ____ »

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття ОС «магістр»

Галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»

Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Спеціалізація «Водопостачання та водовідведення»

Тема : «Моделювання біологічної очистки води на рибній фермі»

Theme: «Modeling of biological water treatment on a fish farm»

Керівник дипломного проекту (роботи) д.т.н., проф. _____ Микола БІЛЯЄВ
(підпис)

Нормоконтролер к.т.н., доц. _____ Віталій КОЗАЧИНА
(підпис)

Студент групи _____ Руслан ПОБЕДЬОННИЙ
(підпис)

Student Ruslan POBIEDONNYI

Дніпро

2021 р

Зміст

АНОТАЦІЯ.....	3
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД	8
РОЗДІЛ 2 БІОЛОГІЧНЕ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ НА РИБНОЇ ФЕРМІ	12
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЗАКУПОРЮВАННЯ ПОРИ МЕМБРАНИ В УСТАНОВЦІ УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІЇ	24
ВИСНОВКИ	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРА	43

АНОТАЦІЯ

В даний час більша увага приділяється питанням очищення води. Одним із сучасних напрямків у цій галузі є метод ультрафільтрації. Він досить економічний і ефективний. Однак існує дефіцит розрахункових методів, які можна використовувати при проектуванні установок ультрафільтрації. В магістерській роботі розглядається розробка математичної моделі для оцінювання ефективності очистки води для рибної ферми за допомогою метода ультрафільтрації.

Об'єкт дослідження – процес очистки води.

Предмет дослідження – розробка математичної моделі для аналізу ефективності роботи установи ультрафільтрації.

Мета роботи - розробка математичної моделі розрахунку ультрафільтрації.

Метод дослідження - математичне моделювання.

Практичне значення - розроблена методика дозволяє скоротити обсяг розрахункових робіт проектувальника.

Ключеві слова - ультрафільтрація, математичне моделювання, обчислювальний експеримент, очистка води.

SUMMARY

Currently, more attention is paid to water purification. One of the modern directions in this field is the method of ultrafiltration. It is quite economical and

efficient. However, there is a shortage of calculation methods that can be used in the design of ultrafiltration plants. The master's thesis considers the development of a mathematical model for evaluating the efficiency of water treatment for a fish farm using ultrafiltration.

The object of study - the process of water purification.

The subject of research is the development of a mathematical model for the analysis of the efficiency of the ultrafiltration facility.

The purpose of the work is to develop a mathematical model for calculating ultrafiltration.

Research method - mathematical modeling.

Practical significance - the developed technique allows to reduce the amount of design work of the designer.

Key words - ultrafiltration, mathematical modeling, computational experiment, water purification.

ВСТУП

Очистка стічних вод широко використовується в усіх країнах світу, тому що представляє собою ефективний засіб ліквідації органічних або інших забруднень. На етапі проектування споруд очистки, реконструкції існуючих реакторів виникає потреба швидко оцінити ефективність роботи споруд для нових умов експлуатації. З часом, конструкції реакторів, 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 невраховують 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

ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Вода, що використовується на рибній фермі (рис.1.1, 1.2) потребує очистки перед скидом у водоймище. Для такої очистки можна використовувати метод ультрафільтрації та біологічне очищення.



Рисунок 1.1. Вид рибної ферми



Рисунок 1.2. Басейн на рибній фермі

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 ставках) і штучних умовах (в біологічних фільтрах, аеротенках, окислювальних каналах та інших типах окиснювачів).

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 важко окиснюваних 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. 1.3 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 тому 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.

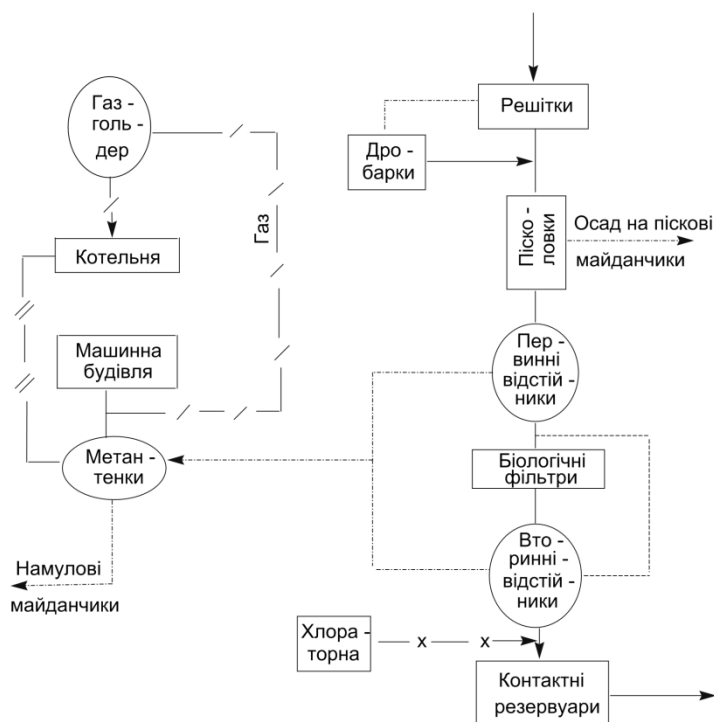


Рисунок 1.3 – Схема механічного і біологічного (на біологічних фільтрах) очищення стічних вод.

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 РИБНОЇ ФЕРМІ

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 2.1 Очищення стоків

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.

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.



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

Рисунок 2.2. - Установка очищения стічні 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 перебої 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 более, 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.

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;

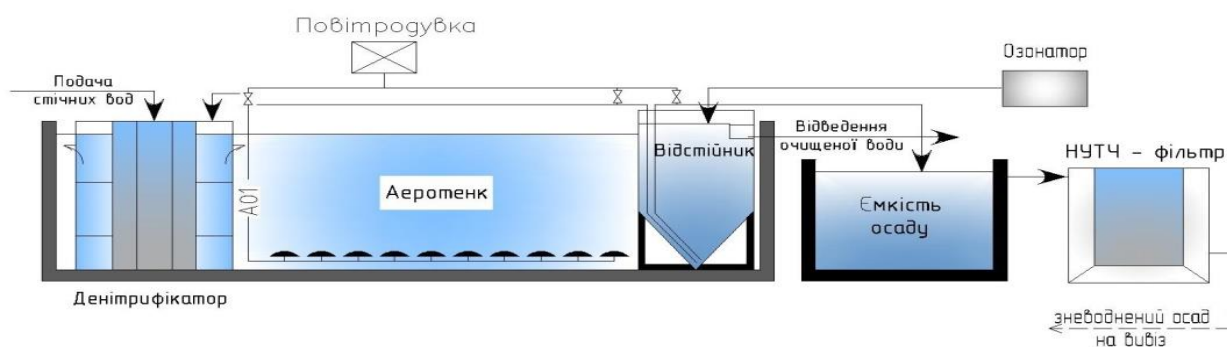
- рівень харчування біомаси;
- біогенні елементи;
- активна реакція середовища.

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

1. У стоках повинні бути присутніми домішки, що піддаються біохімічному руйнуванню, 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.

Нижче на рис. 2.3 показана схема очистки води на рибної фермі , що пропанується в даної роботі.

Технологічна схема



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

Рисунок 2.3. Технологічна схема очищення стічних вод на рибної ферми

Ця комплексна система очищення 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. Денітрифікатор – 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:

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

Дотримання всіх перерахованих вимог дозволяє промисловим підприємству 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.

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, бактеріальних біореакторів, низки анаеробних споруд з вихідним 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 споконвічно існують у природі.

Типи біологічних реакторів для очистки стічних вод на рибній фермі

Задачі, що пов'язані з очисткою води є дуже різноманітними [1, 3, 5, 18 -20, 29, 31, 35 ,36], але рішення усіх задач спрямоване на полішення якості. Для рішення задач даного класу використовується значна кількість наукових інструментів та підходів. Біологічна очистка стічних вод на рибної фермі – є одним з найбільш потужних інструментів очистки стічних вод [1, 22, 25].. Незважаючи на значну складність цього процесу, можливо, коротко визначити його суть: субстрат (забруднювач), що потрапляє в біореактор

(споруду, де має місце біологічна очистка), стає поживчим середовищем для мікроорганізмів в біореакторі. Існують різні споруди для здійснення біологічної очистки стічних вод:

- біофільтри – в цих спорудах стічна вода фільтрується скрізь завантаження, де сформувалася біоплівка (рис.2.4).

-



<http://wrmplast.ru/product/481/>)

Рисунок 2.4– Сучасний біофільтр

Мікроорганізми в біоплівки адсорбують політанти та «переутворюють» їх. Використовуються біофільтри з плоскостним завантаженням, з жорстким блочним завантаженням, з м'яким завантаженням; конструкція біофільтрів – різноманітна в залежності від умов експлуатації;

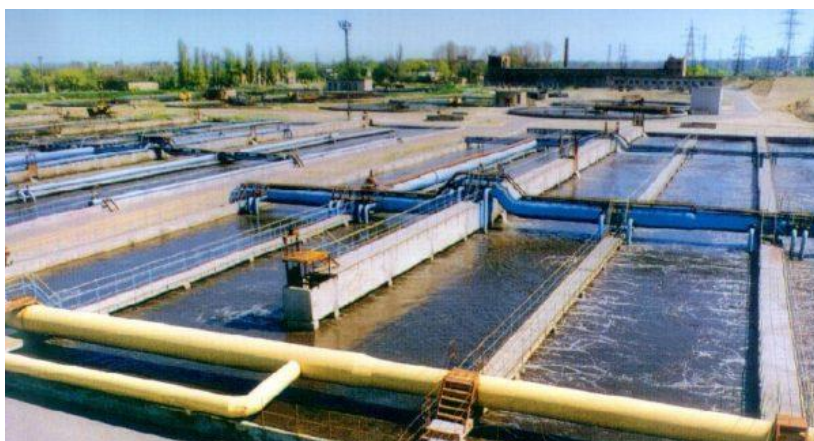
- поля фільтрації –здійснюється подача стічних вод на ґрунт та їх очистка за допомогою мікроорганізмів в ґрунті (рис.2.5);



<https://www.belta.by/photonews/view/polja-filtratsii-skidelskogo-saharnogo-zavoda-13470>

Рисунок 2.5-Поля фільтрації

- Аеротенки – в цих спорудах, активний мул (колонії мікроорганізмів) знаходиться в зваженому стані та в цьому стані має місце «переутворення» субстрату, що потрапляє в аеротенк. Існують різні типи аеротенків: аеротенки – витіснители, аеротенки – змішувачі; аеротенки – відстійники; багатокамерні аеротенки – відстійники;



<https://topas-site.ru/blog/aerotenki-vidy-printsipy-raboty-osobennosti/>

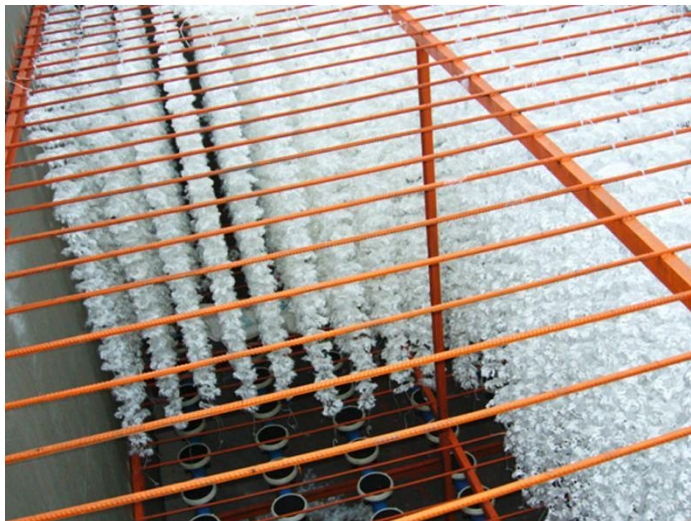
Рисунок 2.6 - Аеротенк

- біологічні ставки - очистка здійснюється в ставках за рахунок властивостей самоочищення водойм.

В наступний час, значна увага в світі приділяється підвищенню ефективності роботи біореактори мають такі переваги:

1. вони надійні;
2. прості в експлуатації;
3. високоефективні;
4. не потребують значного простору для розміщення.

При використанні рухомих блоків (moving carriers), на яких формується біоплівка, площа контактна може бути від $300\text{м}^2/\text{м}^3$ та більше. Розміри, геометрична форма рухомих блоків - дуже різноманітна.



<https://radikal.ru/lfp/s019.radikal.ru/i612/1203/68/a0d0b51e8fe4.jpg/htm>

Рисунок 2.7 Аеротенк з закріпленим біоценозом



https://nomitech.ru/articles-and-blog/bioreaktor_s_podvizhnym_nositelem/

Рисунок 2.8 Аеротенк з рухомим біоценозом

Незважаючи на різноманітність існуючих споруд біологічної чистки,- вони усі мають сумісну платформу: взаємодія мікроорганізмів та субстрату. Склад мікроорганізмів – різноманітний. Розподіл мікроорганізмів в споруді – тяж. Ці параметри змінюються з часом. Все це дуже ускладнює теоретичне дослідження процесів біологічного очищення стічних вод.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ЗАКУПОРЮВАННЯ ПОРИ МЕМБРАНИ В УСТАНОВЦІ УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІЇ

Математична модель

Для очистки води в роботі пропонується використання ультрафільтрації. Розглянемо висновок рівняння масопереносу. Нехай пористе простір повністю заповнене водою в трубке ультрафільтраційної установки. Виділимо в фільтраційному потоці контрольний обсяг у вигляді паралелепіпеда зі сторонами $dx dy dz$ (рис. 1.1).

При виведенні рівняння міграції домішки в мембрані для застосування моделі суцільності будемо розглядати швидкість фільтрації на гранях контрольного обсягу (рис.1.1). Нехай на межі 1 швидкість фільтрації рідини дорівнює u і концентрація домішки в одиниці об'єму рідини - $[кг / м^3]$. Тоді на межі 2, розташованій на відстані dx від межі 1, ці параметри будуть рівні:

$$u + du = \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \right) dx ,$$

$$\varphi + d\varphi = \varphi + \frac{\partial \varphi}{\partial x} dx .$$

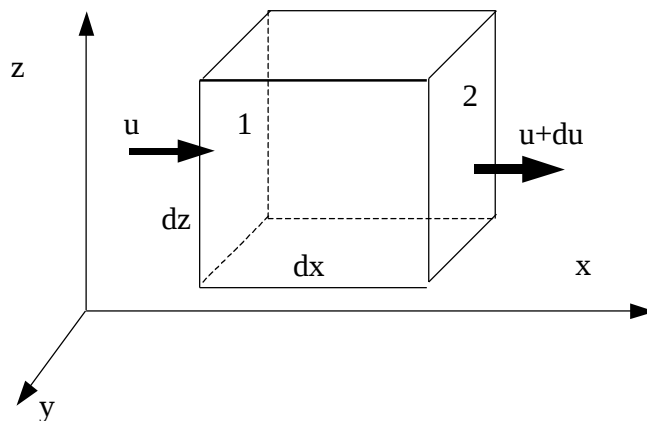


Рисунок. 3.1. Контрольний об'єм для виведення рівняння перенесення домішки

Будемо вважати, що пасивна (що не впливає на гідродинаміку фільтраційного течії) домішка переміщається з рідиною.

За час dt через грань 1 з фільтраційним потоком всередину контрольного обсягу увійде маса домішки

$$\varphi u \, dy \, dz \, dt ,$$

За цей же час через грань 2 з контрольного обсягу вийде маса домішки

$$\left(\varphi u + \frac{\partial \varphi u}{\partial x} dx \right) dy \, dz \, dt ,$$

Будемо вважати, що перенесення домішки через межі контрольного обсягу здійснюється також за рахунок дисперсії. Тоді, через грань 1 за час dt буде перенесена маса домішки

$$q|_1 = -D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} dz \, dy \, dt ,$$

а через грань 2

$$q_2 = q|_1 + \frac{\partial q}{\partial x} dx = \left(-D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x}) dx \right) dz \, dy \, dt ,$$

де D_x - коефіцієнт дисперсії.

Зміна маси домішки в контрольному об'ємі в напрямку осі ox складе

$$\begin{aligned} & \left(u \varphi + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} dx + q + \frac{\partial q}{\partial x} dx \right) dy \, dz \, dt - (u \varphi + q) dy \, dz \, dt = \\ & \cdot = \left(\frac{\partial u \varphi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x}) \right) dx \, dz \, dy \, dt. \end{aligned} ,$$

При вирішенні цього виразу були відкинуті доданки другого порядку малості. Аналогічно, зміна кількості домішки в контрольному об'ємі за рахунок процесів конвекції і дисперсії в напрямку осей oy і oz складе:

$$\left(\frac{\partial v \varphi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \right) dx dy dz dt,$$

$$\left(\frac{\partial w \varphi}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \right) dx dy dz dt,$$

де v, w - компоненти вектора швидкості фільтрації в напрямку осей oy і oz .

Накопичення домішки в контрольному об'ємі $dx dy dz$ за час dt дорівнюватиме

$$\frac{\partial \varphi \cdot n}{\partial t} dx dy dz dt,$$

де n - активна пористість.

Це накопичення викликано плином домішки через кордони контрольного обсягу за час dt . Рівняння балансу маси домішки для контрольного обсягу матиме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial n \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \frac{\partial w \varphi}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Це рівняння є одним з базових рівнянь при вирішенні задач перенесення забруднення в мембрані.

У рівнянні (3.1) для більш повного опису процесу руху домішки розрізняють коефіцієнти дисперсії за різними напрямками. Однак при практичному його використанні значна складність полягає у визначенні залежностей $D = f(x, y, z)$. Експериментальне визначення параметра дисперсії в натурних умовах вимагає великих тимчасових і матеріальних витрат. Слід зазначити, що коефіцієнти дисперсії визначаються шляхом

застосування аналітичного рішення рівняння масопереносу при обробці даних фізичного експерименту, проведеного з метою визначення поля концентрації забруднювача.

При дослідженні процесів масопереносу часто необхідно враховувати процеси сорбції, поглинання.

Для опису процесу незворотною сорбції використовується залежність виду

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \sigma \varphi ,$$

де N - кількість речовини, поглиненого твердої

фазою, в одиниці виділеного обсягу [кг / м³];

σ - константа швидкості сорбції [1 / с];

φ - концентрація речовини в рідкому середовищі [кг / м³].

Дана залежність описує необмежено велику сорбційну ємність породи.

При моделюванні нерідко процес кінетики сорбції описується також рівнянням

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \sigma (\varphi - \varphi_p) , \quad (3.2)$$

де φ - середня концентрація домішки в рідкій фазі;

φ_p - концентрація рівноваги.

Точність прогнозів залежить від точності завдання параметрів моделі.

У ряді випадків при дослідженні міграції забруднень в мембрані необхідно враховувати процес розпаду домішки. Для моделювання цього процесу можна використовувати рівняння кінетики першого порядку

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\sigma_p \varphi , \quad (3.3)$$

де σ_p - константа швидкості розпаду домішки, [1 / с].

Якщо обмежуватися рівнянням кінетики сорбції (або розпаду) то рівняння масопереносу домішки в фільтраційному потоці набуде вигляду

$$\begin{aligned} \frac{\partial n\varphi}{\partial t} + \frac{\partial u\varphi}{\partial x} + \frac{\partial v\varphi}{\partial y} + \frac{\partial w\varphi}{\partial z} + \sigma_p \varphi = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (3.4)$$

На практиці джерела забруднення дуже різноманітні, однак універсальним способом їх математичного опису буде подання їх через дельта-функції Дірака. Це уявлення викидів у вигляді системи точкових джерел, які можуть бути постійно діючими (стаціонарними), або джерелами, діючими протягом певного часу.

Надалі джерела забруднення інтенсивністю Q_i , розташовані в фільтраційних потоках, будемо описувати за допомогою дельта-функції Дірака. У цьому випадку рівняння руху забруднювача в фільтраційному потоці набуде вигляду

$$\begin{aligned} \frac{\partial n\varphi}{\partial t} + \frac{\partial u\varphi}{\partial x} + \frac{\partial v\varphi}{\partial y} + \frac{\partial w\varphi}{\partial z} + \sigma_p \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \\ + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) \end{aligned} \quad (3.5)$$

де - інтенсивність точкового викиду,

x_i, y_i, z_i - координати розташування точкового джерела забруднення, кг/с,

$\delta(x - x_i), \delta(y - y_i), \delta(z - z_i)$, - позначення дельта-функція Дірака.

При вирішенні багатьох прикладних задач має сенс використовувати двовимірну планову модель перенесення домішки в фільтраційному потоці

$$\begin{aligned} \frac{\partial n\varphi}{\partial t} + \frac{\partial(u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\varphi)}{\partial y} + \tilde{\sigma}_p \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \sum \bar{Q}_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \end{aligned} \quad (3.6)$$

де - усереднена по глибині потоку інтенсивність точкового викиду.

Метод розв'язку

Для чисельного інтегрування двовимірного рівняння масопереносу використовується неявна поперемінно-трикутна різницева схема. Розглянемо її побудову.

Процес перенесення забруднення в мембрані в разі двовимірної постановки задачі описується рівнянням виду

$$\begin{aligned} n \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \sigma \cdot \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(r - r_i(t)) \end{aligned} \quad (3.7)$$

з відповідними граничними і початковими умовами [5].

Побудуємо абсолютно стійку неявну різницеву схему для вирішення рівняння (3.7) в області

$$G = \{0 \leq t \leq T, 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y\},$$

розбитою рівномірної прямокутної сіткою. Невідоме значення концентрації забруднення будемо визначати в центрі різницевого осередків, а компоненти вектора швидкості u , v - на сторонах осередків (рис.3.2).

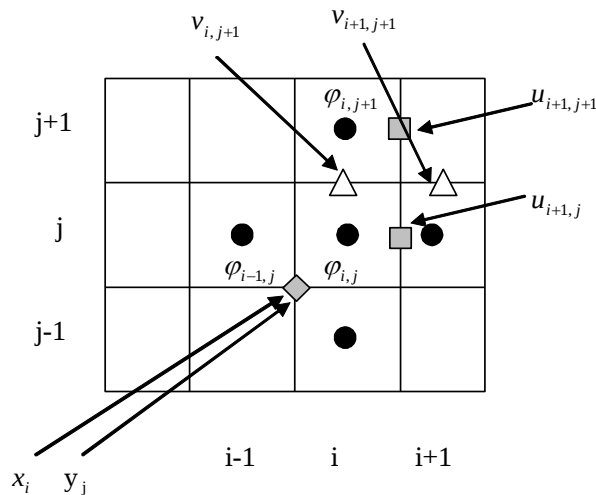


Рисунок 3.2. Схема вузлів для визначення змінних в різницевих алгоритмах

Похідну за часом апроксимуємо розділеної різницею «назад»

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \approx \frac{\varphi_{ij}^{n+1} - \varphi_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Виділимо в конвективних похідних складові однонаправленого перенесення і запишемо їх у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial u \varphi}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ \varphi}{\partial x} + \frac{\partial u^- \varphi}{\partial x} \\ \frac{\partial v \varphi}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ \varphi}{\partial y} + \frac{\partial v^- \varphi}{\partial y}, \end{aligned} \quad (3.8)$$

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

З урахуванням (3.8) апроксимуємо конвективні похідні розділеними різницями "проти потоку" на верхньому часовому шарі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^+ \varphi}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ \varphi_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ \varphi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ \varphi^{n+1}; \\ \frac{\partial u^- \varphi}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- \varphi_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- \varphi_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- \varphi^{n+1}; \\ \frac{\partial v^+ \varphi}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ \varphi_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ \varphi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ \varphi^{n+1}; \\ \frac{\partial v^- \varphi}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- \varphi_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- \varphi_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- \varphi^{n+1}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Компоненти швидкості u будемо визначати на вертикальних гранях різницевих осередків, а компоненти швидкості v — на горизонтальних гранях. Індеси цих граней відповідають індексам осередків, розташованих правіше або вище відповідної межі (див. рис. 3.2).

Другі похідні апроксимуємо наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x}) &\approx \tilde{D}_{xp} \frac{\varphi_{i+1,j}^{n+1} - \varphi_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \tilde{D}_{xl} \frac{\varphi_{ij}^{n+1} - \varphi_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = \\ &= M_{xx}^- \varphi^{n+1} + M_{xx}^+ \varphi^{n+1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y}) &\approx \tilde{D}_{yp} \frac{\varphi_{i,j+1}^{n+1} - \varphi_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \tilde{D}_{yl} \frac{\varphi_{ij}^{n+1} - \varphi_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = \\ &= M_{yy}^- \varphi^{n+1} + M_{yy}^+ \varphi^{n+1} \end{aligned}$$

$$\text{де } \tilde{D}_{xp} = \frac{2D_{i+1,j}D_{ij}}{D_{i+1,j} + D_{ij}}, \quad \tilde{D}_{xl} = \frac{2D_{i,j}D_{i-1,j}}{D_{ij} + D_{i-1,j}}$$

Тут L_x^+ , L_x^- , L_y^+ , L_y^- , M_{xx}^+ , M_{xx}^- , M_{yy}^+ , M_{yy}^- - умовні позначення різницевого операторів. З урахуванням наведених вище позначень запишемо різницевий аналог рівняння:

$$\begin{aligned} n \frac{\varphi_{ij}^{n+1} - \varphi_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ \varphi^{n+1} + L_x^- \varphi^{n+1} + L_y^+ \varphi^{n+1} + L_y^- \varphi^{n+1} + \sigma \varphi_{ij}^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ \varphi^{n+1} + M_{xx}^- \varphi^{n+1} + L_{yy}^+ \varphi^{n+1} + L_{yy}^- \varphi^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

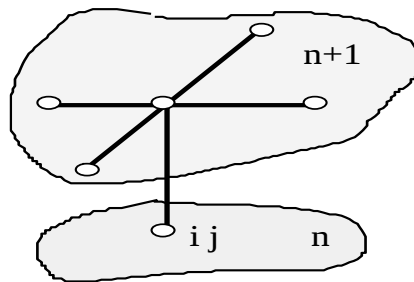


Рисунок 3.3. Форма шаблону різницевого рівняння (3.11)

Позначимо δ_{ij} - число «1» або «0», в залежності від того, розташований чи ні в разностной осередку « ij » джерело забруднення. Значення q_{ij} одно інтенсивності q_k відповідного k -го джерела, розміщеного в разностной осередку « ij », поділений на площу цього осередку

$$q_{ij} = q_k / \Delta x / \Delta y.$$

Шаблон різницевого рівняння (3.11) наведено на рис. 3.3, звідки видно, що на верхньому часовому шарі $t = t^{n+1}$ використовуються невідомі значення функції в п'яти точках різницевої сітки.

Розщепити різницеве рівняння (3.11) на чотири різницевих рівняння так, щоб на кожному кроці враховувалося лише один напрямок перенесення збурень, яке визначається знаком при конвективної похідною. В цьому випадку різницеві рівняння мають вигляд:

– на першому кроці розщеплення $k = \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} n \frac{\varphi_{ij}^{n+k} - \varphi_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ \varphi^k + L_y^+ \varphi^k) + \frac{\sigma}{4} \varphi_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ \varphi^k + M_{xx}^- \varphi^n + M_{yy}^+ \varphi^k + M_{yy}^- \varphi^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

– на другому етапі розщеплення $k = n + \frac{1}{2}; c = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} n \frac{\varphi_{ij}^k - \varphi_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- \varphi^k + L_y^- \varphi^k) + \frac{\sigma}{4} \varphi_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- \varphi^k + M_{xx}^+ \varphi^c + M_{yy}^- \varphi^k + M_{yy}^+ \varphi^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

– на третьому етапі розщеплення $k = n + \frac{3}{4}; c = n + \frac{1}{2}$:

$$\begin{aligned} n \frac{\varphi_{ij}^k - \varphi_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ \varphi^k + L_y^- \varphi^k) + \frac{\sigma}{4} \varphi_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- \varphi^c + M_{xx}^+ \varphi^k + M_{yy}^- \varphi^k + M_{yy}^+ \varphi^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

– на четвертому етапі розщеплення $k = n + 1; c = n + \frac{3}{4}$:

$$n \frac{\varphi_{ij}^k - \varphi_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- \varphi^k + L_y^+ \varphi^k) + \frac{\sigma}{4} \varphi_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4} (M_{xx}^- \varphi^k + M_{xx}^+ \varphi^c + M_{yy}^- \varphi^c + M_{yy}^+ \varphi^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l.$$

В такому випадку в різницеві рівняння входить значення $\bar{q}_l = \frac{q_i}{\Delta x \Delta y}$.

Функція δ_l тотожно дорівнює нулю у всіх осередках, крім тих, де розташоване джерело викиду забруднюючих речовин.

При апроксимації других похідних використовується два часових прошарки як в методі В. К. Саульєва. На верхньому часовому шарі обчислюється та частина різницевих операторів M_{xx} , M_{yy} , яка узгоджується з напрямком розділеної різниці для конвективного похідною. З огляду на односторонньої апроксимації конвективних похідних такий підхід дозволяє використовувати значення невідомої функції в трьох різницевих вузлах на верхньому часовому шарі для кожного кроку розщеплення. Форма шаблонів різницевих рівнянь і напрям перенесення домішки на кожному кроці представлена на рис. 3.4, 3.5.

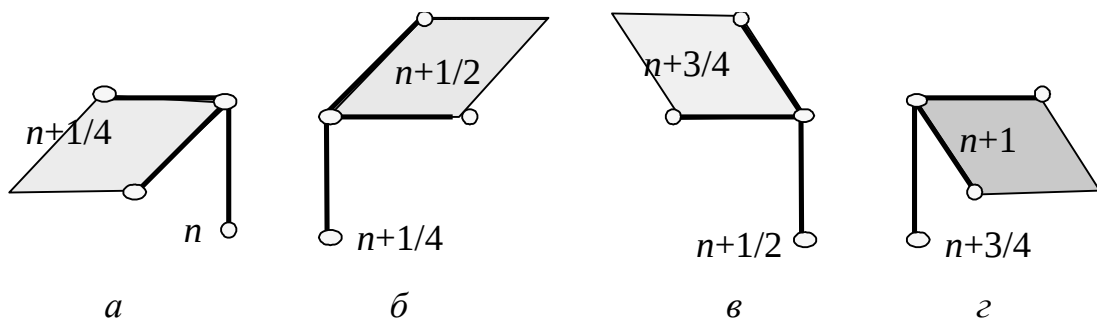


Рисунок 3.4. Форма шаблонів різницевих рівнянь:

а - перший крок розщеплення; б - другий крок;

в - третій крок; г - четвертий крок.

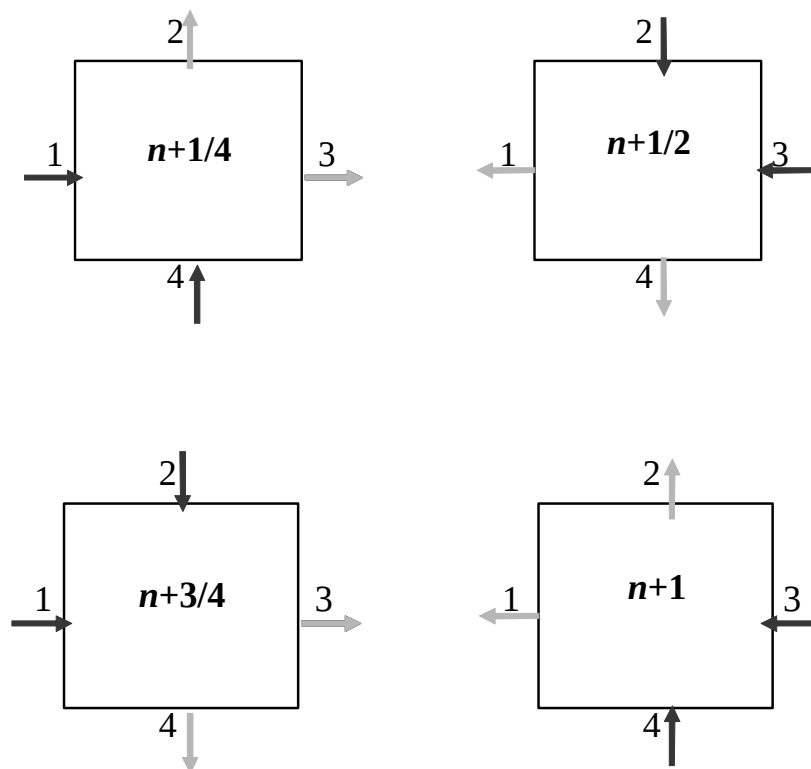


Рисунок 3.5. Напрямок розповсюдження збурень на кожному кроці розщеплення

Оскільки на кожному кроці розщеплення шаблон різницевих рівнянь має трикутну форму на верхньому часовому шарі, невідоме значення функції можна легко знайти за методом «біжить рахунку».

Використання явних формул для визначення невідомого значення концентрації забруднюючої речовини на кожному кроці розщеплення дозволяє побудувати ефективний чисельний алгоритм інтегрування вихідного диференціального рівняння, в той же час є абсолютно стійким.

Результати досліджень

На базі розробленої моделі був проведений обчислювальний експеримент по дослідженню процесу закупорювання пори мембрани при ультрафільтрації води на рибної фермі.

Моделювання виконано при таких вихідних даних: розміри розрахункової області – 1000мм; діаметр мембрани – 0,005мм; швидкість течії 0,001 м/с; тиск 12 атм.

Моделювання виконано для різних варіантів форми пори.

Перший варіант. Розглядається мембрана, яка має складну форму та має «полочку». Результати розрахунку представлені на рис. 3.6 – 3.11.

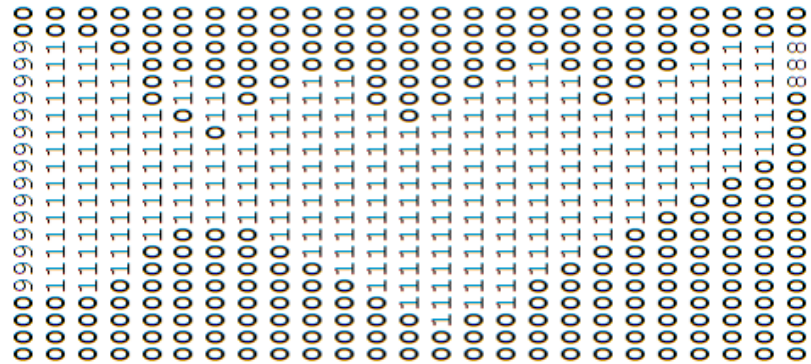


Рисунок 3.6. Пора мембрани перед початком ультрафільтрації, $t = 0$.

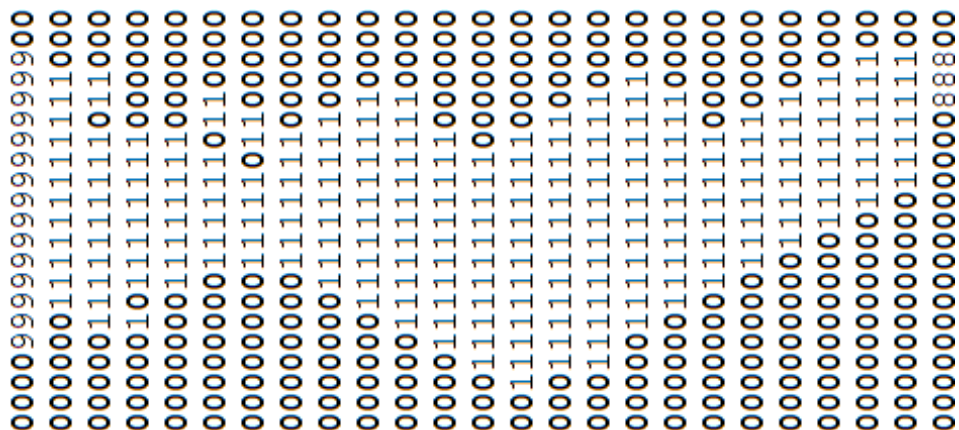


Рисунок 3.7. Пора мембрани для моменту часу $t = 3$ мін.

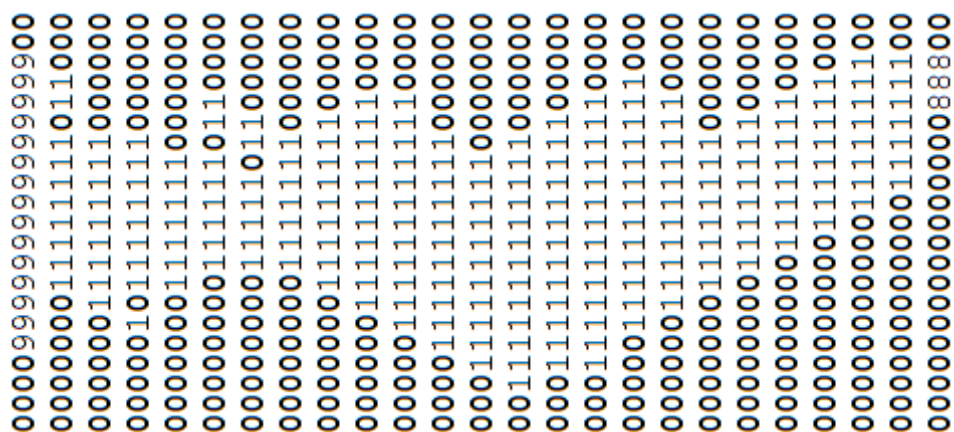


Рисунок 3.8 Пора мембрани для моменту часу $t = 3,6$ мін.

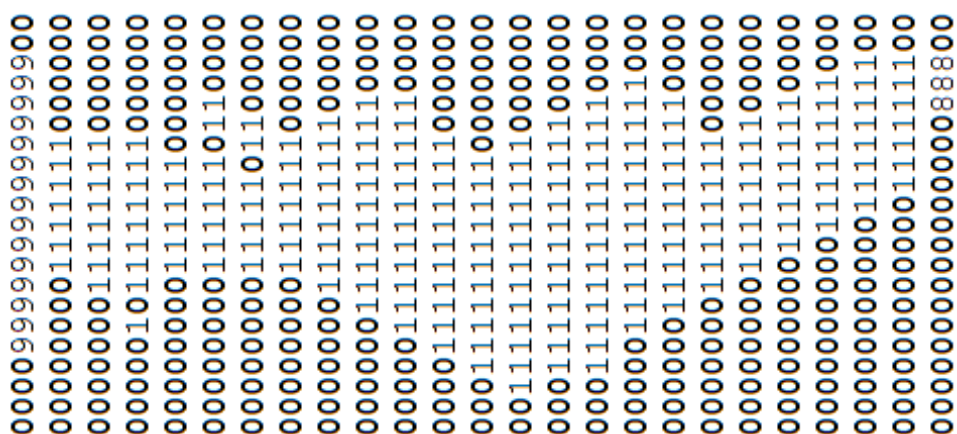


Рисунок 3.9 Пора мембрани для моменту часу $t = 4,2$ мін.

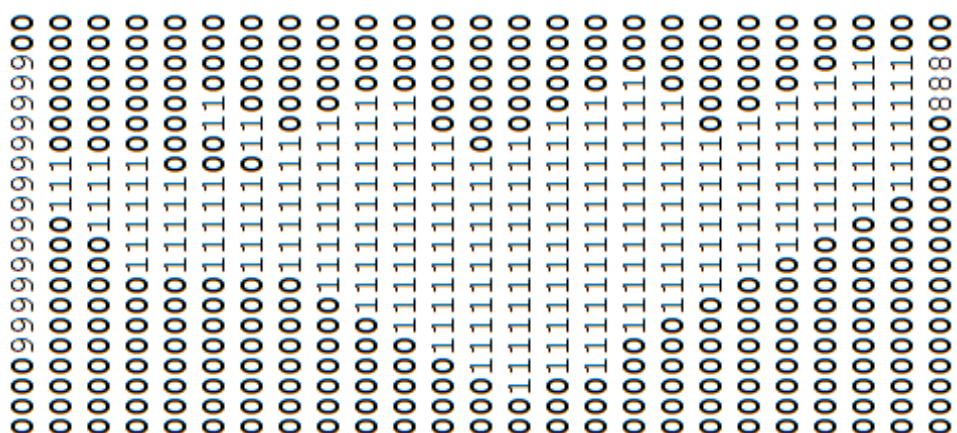


Рисунок 3.10. Пора мембрани для моменту часу $t = 6$ мін.

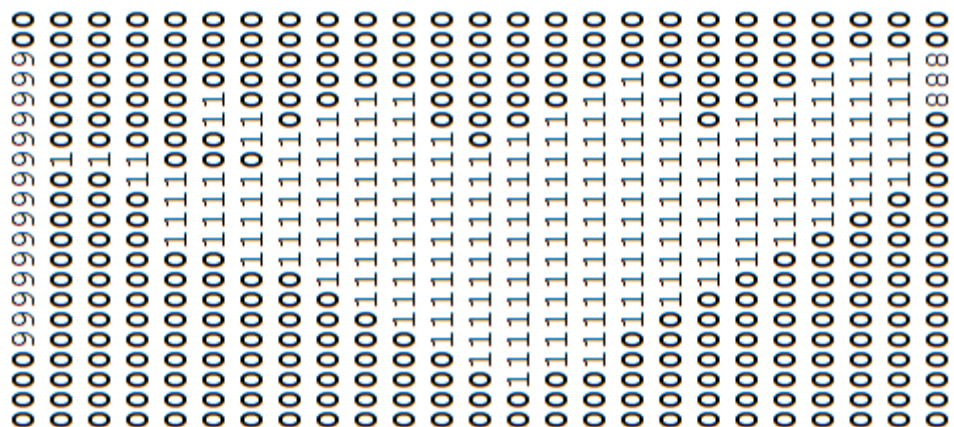


Рисунок 3.11. Пора мембрани для моменту часу $t = 7,2$ мін.

Як ми бачимо з цих рисунків закупорювання пори здійснюється в момент часу 7 мін.

Другий варіант. Пора складної форми з уступом.

Результати вирішення цієї задачі наведені на рис.3.12 – 3.15.

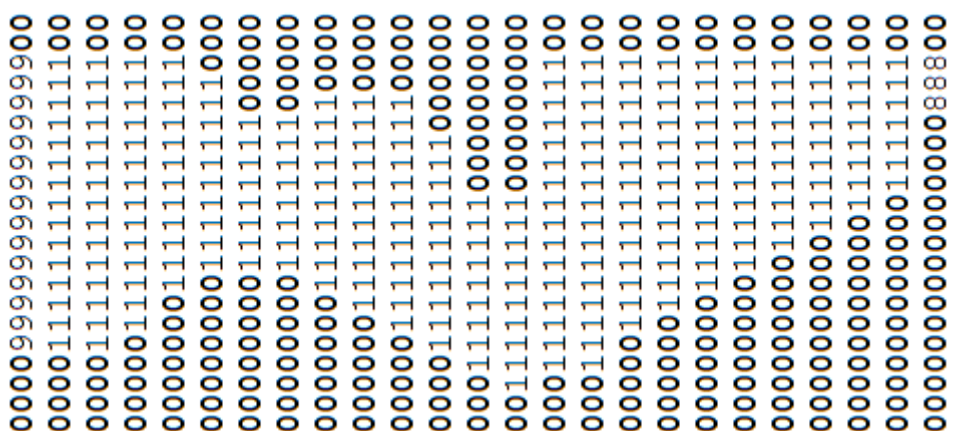


Рисунок 3.12. Пора мембрани перед початком ультрафільтрації, $t = 0$.

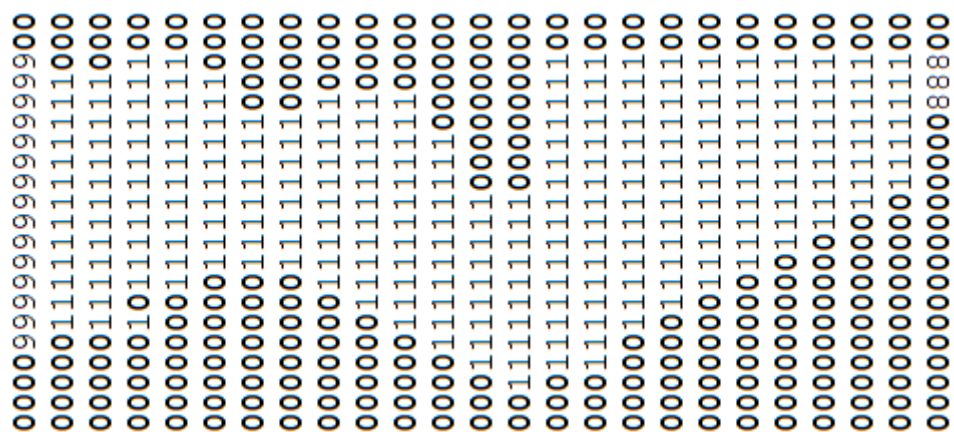


Рисунок 3.13 Пора мембрани для моменту часу $t = 1,5$ мін.

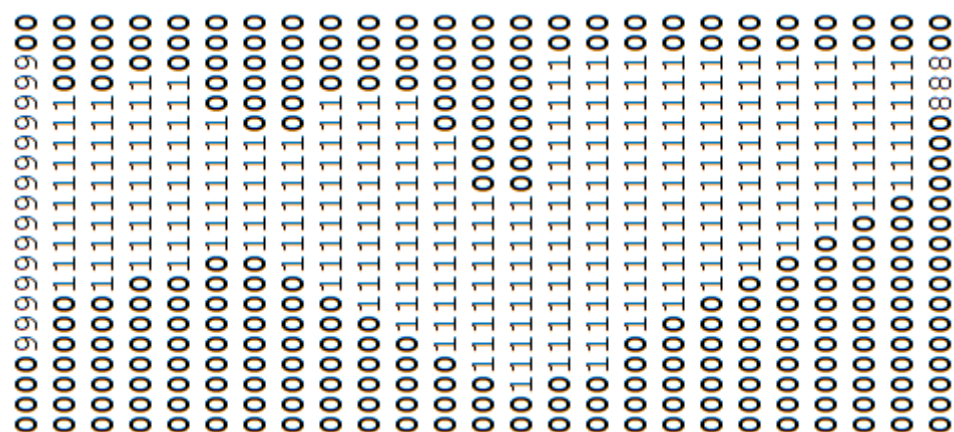


Рисунок 3.14. Пора мембрани для моменту часу $t = 2,4$ мін.

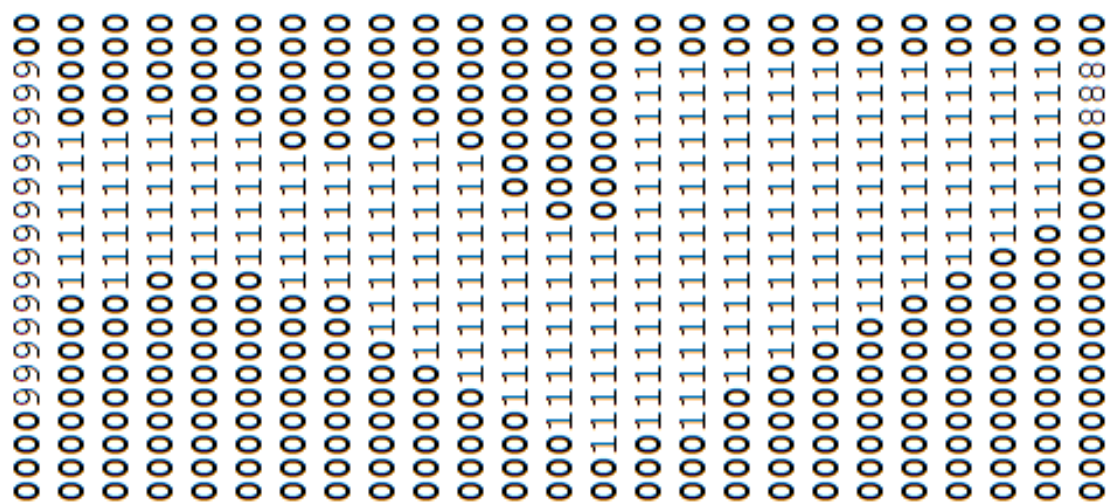


Рисунок 3.15 Пору мембрани для моменту часу $t = 3,6$ мін.

Як ми бачимо для другого варіанту задачі процес закупорювання пори – повільний.

Третій варіант. Пору, яка має «вставки».

Результати вирішення цієї задачі наведені на рис.3.16 – 3.20.

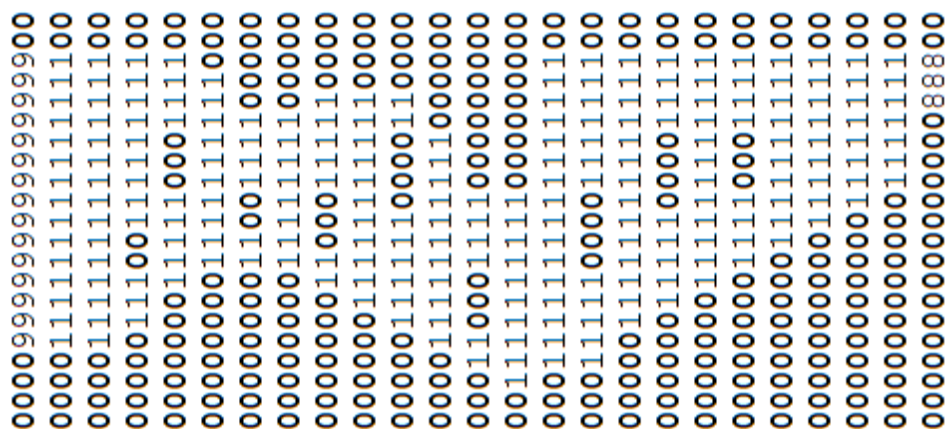


Рисунок 3.16. Пору мембрани перед початком ультрафільтрації, $t = 0$.

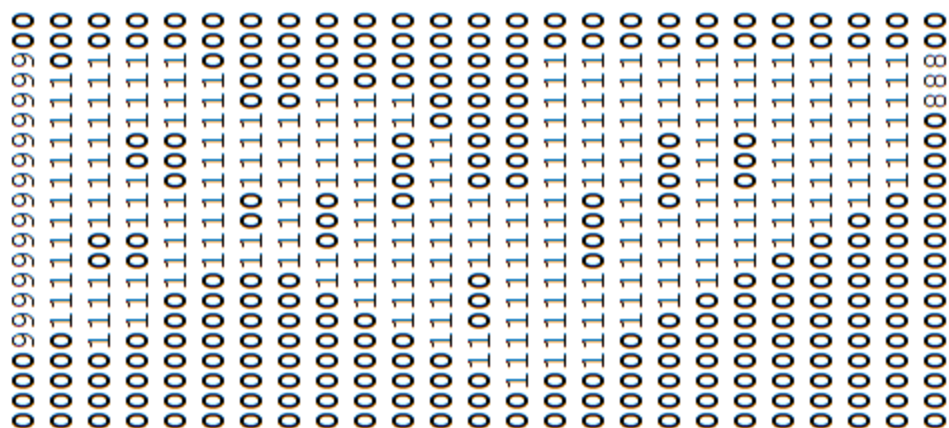


Рисунок 3.17 . Пору мембрани для моменту часу $t = 1,2$ мін.

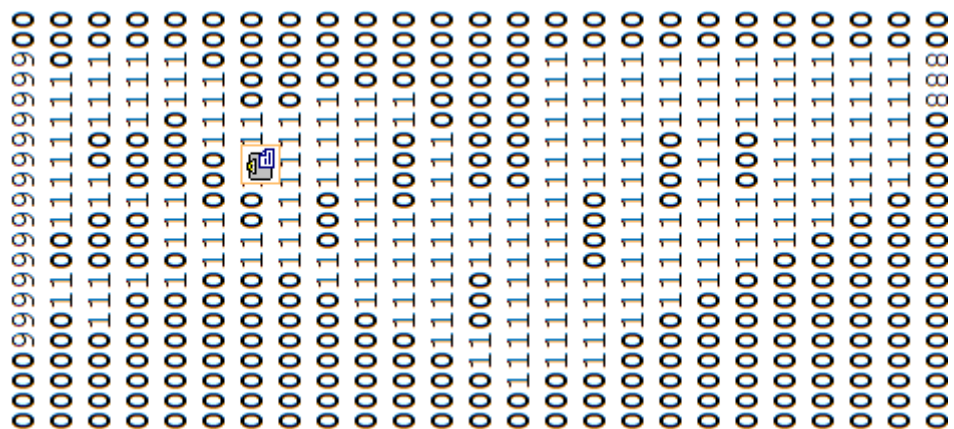


Рисунок 3.18. Пору мембрани для моменту часу $t = 1,8$ мін.

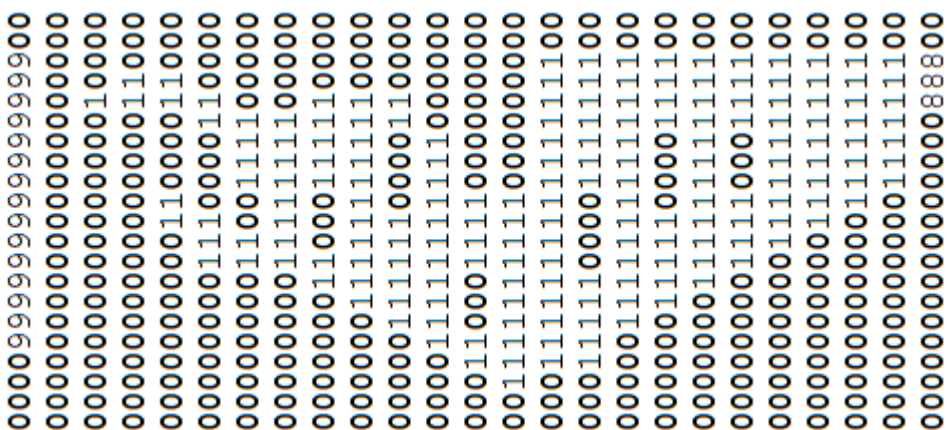


Рисунок 3.19. Пору мембрани для моменту часу $t = 3$ мін.

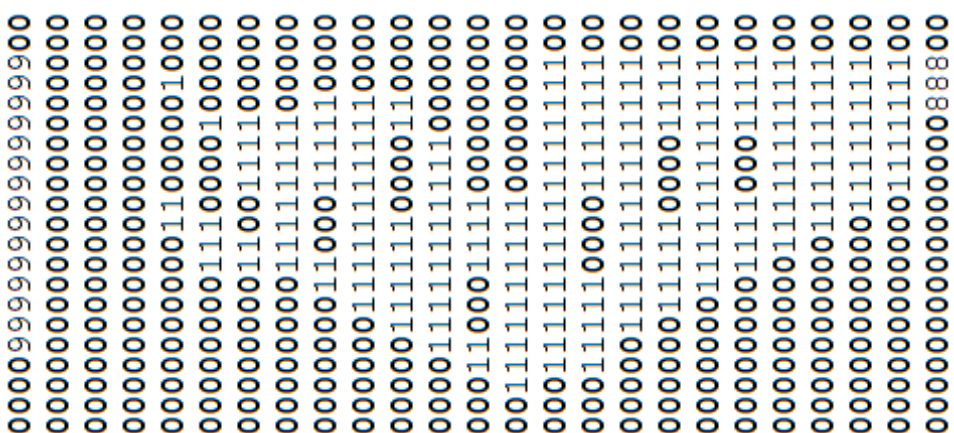


Рисунок 3.20 Пору мембрани для моменту часу $t = 3,6$ мін.

Як ми бачимо з наведених рисунків дуже швидко має місце закупорювання пори мембрани на вставках. К моменту часу 3,6 мін пора мембрани повністю закупорена.

Таким чином, ми визначили час коли потрібно здійснити зупинення установки ультрафільтрації на рибної фермі та здійснити промивку мембрани.

ВИСНОВКИ

1. Побудовано математичну модель процесу ультрафільтрації води на рибної фермі.
2. Побудована чисельна модель процесу ультрафільтрації.
3. Виконано розрахунок процесу закупорювання пори мембрани при ультрафільтрації води на рибної фермі. При розрахунку враховувалося, що пора має складну геометричну форму.
4. Виконано розрахунок процесу закупорювання пори мембрани при ультрафільтрації. Пора має складну геометричну форму та вставки.
5. Визначено час закупорювання пори мембрани, яка має складну геометричну форму. Цей час визначає час призупинення роботи установки для очищення води на фермі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРА

1. Айрапетян Т.С., Телима С.В., Олійник О.Я. Моделювання кисневого режиму в біореакторах-аеротенках при очистці стічних вод від органічних забруднень / Допов. Нац. акад. наук Укр. 2017. № 6. С.21 – 27.
2. Аргучинцев В. К., Аргучинцев А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2007. 255с.
3. Бабенко, С.П. Тонкошаровий елемент удосконаленої конструкції для видалення з води завислих речовин: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / С.П. Бабенко. – Харків: ХНУБА, 2014. – 22 с.
4. Беляєв М.М., Долина Л.Ф., Козачина В.А., Лемеш М.В. Численные модели для расчета гидродинамики и массопереноса в системах очистки воды. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», 11-12 грудня, 2019 р. – Дніпро, ДНУЗТ – С. 53.
5. Беляєв, Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках [монографія] / Н. Н. Беляєв, В. А. Козачина. – Д.: Акцент ПП, 2015. – 115 с.
6. Беляєв Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В. Информационная система «WASTE-WATERTREATMENT» для оценки эффективности работы очистных сооружений. XI Международная научно-практическая конференция «Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании», 13.12.2017 - 14.12.2017, Дніпро, 2017.
7. Біляєв М.М., Козачина В.А., Лемеш М.В. Дослідження процесу очистки стічних вод на базі чисельних моделей. 73 Науково-технічна

конференція Харківського національного університету будівництва та архітектури, 6-7 лютого, 2018, Харків.

8. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В., Стуликов З.Г. Математическое моделирование биологической очистки сточных вод в аэротенках. Материалы международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроению», 27-29 березня, 2018. Дніпро, 2018.

9. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В., Грабар Я.А. Математические модели в задачах очистки сточных вод. IV Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація систем», 1-2 листопада 2018р. – Дніпро, УДХТУ – С. 37.

10. - Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В. Информационная система для анализа работы аэротенков. XII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні і комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», 12-13 грудня, 2018р. – Дніпро, ДНУЗТ – С. 128.

11. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В., Кириченко П.С. Компьютерное моделирование очистки сточных вод. Матеріали V Міжнародної науково – технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», 6 – 8 листопада 2019, м. Дніпро, с.22.

12. Беляев Н.Н., Козачина В.А., Лемеш М.В., Кириченко П.С. Математические модели в задачах очистки сточных вод // Матеріали IX Міжнародної наукової конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд», 15 -16 жовтня 2019, Харків, ХНУБА. С. 5.

13. Беляев, Н.Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения [монографія] / Н.Н. Беляев, Е.К. Нагорная. – Д.: Нова ідеологія, 2012. – 112 с.

14. Беляев, Н.Н. CFD моделирование процесса формирования осадка в горизонтальном отстойнике / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – №3 (81). – С. 222-225.

15. Беляєв, Н.Н. CFD моделювання роботи горизонтального двохетажного отстойника з поворотом потоку в вертикальній площині / Н.Н. Беляєв, В.А. Козачина // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Д.: НГУ, 2014. – №45. – С. 152-157..
16. Беляєв, Н.Н. CFD моделювання роботи горизонтального отстойника со струєнаправляючими пластинами / Беляєв Н.Н., Козачина В.А // Вода та водоочисні технології. Науково-технічні вісті. – К., 2014. – №2 (15) – С. 50-55.
17. Біляєв М.М., Козачина В.А., Лемеш М.В., Кіріченко П.С. Моделювання очистки води в системах «аеротенк - відстійник» // East European Scientific Journal. – 2019. – Vol 10(50). – Р. 10-15.
18. Бертокс П., Радд Д. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений. М.: «Мир», 1980. - 606с.
19. Бойко Т.В., Жежерун Я.В. Алгоритмізація розрахунку біологічного очищення стічних вод в аеротенках // Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку –КМХТ-2019, с.290 -293
20. Бомба А. Я. А. П. Сафоник А.П. Математичне моделювання процесу аеробного очищення стічних вод в пористому середовищі / Математичне та комп'ютерне моделювання, 2011. с.36 -44
21. Василенко А.И. Проектирование канализации населенных мест / А.И. Василенко, А.А. Василенко. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – К.: Будівельник, 1985. – 136 с.
22. Василенко, О.А. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та розрахунки: Навчальний посібник / О.А. Василенко, С.М. Епоян – Київ, Харків: КНУБА, ХНУБА, ТО Ексклюзив, 2012. – 540 с.
23. Водовідведення і очищення стічних вод міста. Навчальний посібник / [С.М. Епоян, Г.М. Смірнова, І.В. Корінько, С.П. Пашкова,

В.Ю. Сорокіна, Г. Вевелєр]. – Харків: Видавнича група «РА Каравела», 2003. – 144 с.

24. Водоотведение и очистка сточных вод. Учебник для вузов / [С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.И. Калищун]. – М.: Стройиздат, 1996. — 591 с.

25. Водопостачання та очистка природних вод. Навчальний посібник / С.М. Епоян, В.Д. Колотило, О.Г. Друшляк, Г.І. Сухоруков, Т.С. Айрапетян. – Х.: Фактор, 2010. – 192 с.

26. Воронов, Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебное пособие / Ю.В. Воронов. - М.: Издательство Ассоциация строительных вузов, 2009. – 760 с.

27. Горносталь С.А., Петухова Е.А., Уваров Ю.В. Повышение эффективности работы сооружений биологической очистки городских сточных вод.: Монография, Х.: НУГЗУ, 2015, 102с.

28. Гуревич, М. И. Теория струй идеальной жидкости / М.И. Гуревич. – М.: Наука, 1979. – 536 с.

29. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування / К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – 2013. – 128 с.

30. Душкин, С.С. Разработка научных основ ресурсосберегающих технологий подготовки экологически чистой питьевой воды / С.С. Душкин, Г.И. Благодарная. – Харьков: ХНАГХ, 2009. – 95 с.

31. 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, ХОТБ АБУ. – 2012. – Вип. 68. – С. 244-248.

32. 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.

33. 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.

34. Канализация / С.В. Яковлев, Я.Л. Карелии, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – [5-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Стройиздат, 1975. – 632 с.

35. 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.

36. 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.