

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 Оцінка ефективності використання водобійної стінки для захисту  
поверхневих вод від забруднення

Керівник магістерської роботи  
Студент

доц. Машихіна П.Б.  
Мірошніченко Владислав Русланович

Дніпро  
2020 р.

## **Зміст пояснювальної записки**

Анотація .....	
Вступ .....	
Розділ 1 Моделювання гідродинаміки при наявності водобійної стінки..	
Розділ 2 Експериментальне дослідження.....	
Розділ 3 Теоретичне дослідження ефективності роботи стінки.....	
Висновки .....	
Список використаних джерел.....	

## Анотація

Водобійна стінка є важливим елементом деяких гідротехнічних споруд. Ця стінка може також бути елементом захисту водного середовища від антропогенного забруднення. Для того щоб прогнозувати ефективність використання водобійної стінки для задач захисту водного середовища від забруднення необхідно мати математичні моделі. На базі таких моделей можна виконувати прогнозні розрахунки для обґрунтування раціональних параметрів стінок.

**Мета роботи** - розробка чисельної моделі для оцінки впливу використання водобійної стінки для захисту водного середовища.

**Об'єкт дослідження** – процес конвективно-дифузійного розповсюдження домішки у річці при скиді стічних вод

**Предмет дослідження** – забруднення акваторії річки.

**Методи дослідження** – математичне моделювання.

**Практичне значення** – розроблена математична модель прогнозу впливу водобійної стінки на зниження забруднення водного середовища.

**Ключові слова** – забруднення річки, водобійна стінка, математичне моделювання, скид стічних вод.

## Abstract

The water wall is an important element of some hydraulic structures. This wall can also be an element of protection of the aquatic environment from anthropogenic pollution. In order to predict the effectiveness of the water wall for the protection of the aquatic environment from pollution, it is necessary to have mathematical models. On the basis of such models it is possible to carry out forecast calculations for a substantiation of rational parameters of walls.

**Purpose:** development of a numerical model to assess the impact of the use of the water wall to protect the aquatic environment.

**The object of study** - the process of convective-diffusion distribution of impurities in the river during wastewater discharge.

The subject of research is pollution of the river.

**Research methods** – mathematical modeling.

The practical significance of the obtained results. The mathematical model of the forecast of influence of a water wall on decrease pollution of water environment is developed.

**Keywords:** river pollution, water wall, mathematical modeling, wastewater discharge.

## Вступ

Вода - найбільш поширене і найбільш важлива речовина на Землі. Дві третини поверхні Землі займають моря і океани. У них зосереджено

$1,5 \cdot 10^{21}$  кг води.

Вода - єдина речовина, яку нічим не можна замінити. Навіть деякі продукти харчування вже одержують штучним шляхом. А потреба живого організму у воді може задовольнити тільки вода. Останні підрахунки визначили загальний об'єм води на нашій планеті цифрою - 1385 мільйонів кубічних кілометрів. Якби Земля була правильну сферу, то цієї кількості було б достатньо, щоб покрити її на глибину 2650 метрів. Лише незначна частина цієї води придатна для використання людиною. Абсолютна більшість цієї колосальної маси - це гіркувато-солоня морська вода непридатна для життя та технічного використання. Тільки 2,5% води є прісною - придатною для пиття. Обсяг прісної води, який є в розпорядженні людини для споживання, залежить від її швидкості, з якою джерела прісної води оновлюються або відновлюються з допомогою глобального гідрологічного циклу. Щорічно цей цикл тримає в облозі 113000 км<sup>3</sup> води на наших континентах, 72000 км<sup>3</sup> з яких випаровується знову в атмосферу.

Соціоекологічних складові значною мірою впливають на доступ до води. Країни, які розвиваються, можуть не мати капіталу і технологій для початку використання потенційних водних ресурсів.

Доступ ще більше ускладнюється конфліктами, які відбуваються у зв'язку з правами на воду, в басейнах річок і озер, що належать двом і більше країнам, і на воду у водоносних пластах, які перетинають міжнародні кордони. Території реальних або потенційних конфліктів також долини річок Ніл, Тигр, Євфрат, Ганг, Брахмапутра.

Серед природних ресурсів вода займає особливе місце. Протягом тривалої геологічної історії вона створила на нашій планеті середовище, сприятливе

для виникнення всього живого, в тому числі і людини. Цю виняткову роль води зазначав творець науки геохімії академік В.І. Вернадський.

Вода є також ресурсом, без якого неможлива господарська діяльність людини. Вона бере участь практично у всіх виробничих процесах, є джерелом дешевої енергії, сприяє транспортуванню вантажів, необхідна в побуті. Так, на виробництво тонни чавуну витрачається до 200 м<sup>3</sup>, сталі - близько 30 м<sup>3</sup>, синтетичного волокна - 500 м<sup>3</sup> води. Великі витрати води і в сільському господарстві, де на вирощування зерна потрібно майже 1500 м<sup>3</sup>, а бавовни - до 7500 м<sup>3</sup> води.

Споживання води людством постійно зростає. Особливо бурхливе зростання наголошується в масштабах використання води для виробничих цілей.

Істотна відмінність води від інших природних ресурсів - здатність її безперервно відновлятися внаслідок природного кругообігу, що зв'язує гідросферу з атмосферою, літосферою і біосферою. Переходячи з газоподібного стану в рідкий, вода переміщається з атмосфери на сушу, у річки та водойми. Океанічні течії, стік річок та підземних вод, переміщення вологих мас над континентами, рух води з ґрунту від корінь до листів рослин - це все ланки кругообігу води в природі. Завдяки цій здатності води до самопоновлення, її ресурси довгий час здавалися невичерпними. У той же час науково - технічний прогрес, сприяє залученню в господарський оборот все більшої кількості води з різних джерел, є одночасно фактором, інтенсивно впливає на стан водних ресурсів.

В умовах збільшення обсягів водоспоживання і скидання у водойми забруднених вод головна небезпека полягає в погіршенні їх якості. У ріки та інші водойми щорічно скидається понад 450 км<sup>2</sup> стічних вод, при цьому близько половини з них без попереднього очищення. Для того щоб води зберегли свою самоочищаються здатність, необхідно не менш ніж десятикратне розведення стоків свіжою водою. Забруднена вода стає не тільки непридатною або малопридатною для використання, але і приносить іноді невиправний шкоди природному середовищу, з якою вона стикається.

Все це призвело до того, що якщо раніше складнощі у вирішенні проблеми забезпечення водою існували тільки для країн і районів, розташованих в умовах пустель йди напівпустель, то зараз почали відчувати її нестачу багато індустріально розвинені країни.

Рішення проблеми водозабезпечення на тлі зростаючих водоспоживання та забруднення ускладнюється також нерівномірністю розподілу водних ресурсів по регіонах. Тому часто природна водозабезпеченість території явно не відповідає потребам.

З позицій сьогодення тут визначаються два основних взаємопов'язаних стратегічних напрями раціонального використання водних ресурсів. Перше передбачає більш повне використання й розширене відтворення ресурсів прісних вод. Другий напрямок включає розробку нових технологічних процесів і методів господарювання, що дозволяють запобігти забрудненню водоймищ і звести до мінімуму споживання свіжої води. Таким чином, складовими частинами раціонального використання водних ресурсів є їх виявлення, освоєння, перетворення і охорона. Її головна спрямованість полягає у підвищенні ефективності використання водних ресурсів при збереженні та покращенні та їх якості

Жодна сфера людської діяльності не обходиться без використання води, адже вона – це саме життя. Для організму вода є «будівельним» матеріалом, підтримуючи його життєві функції. Людина використовує воду для пиття і приготування їжі, задоволення різних життєвих, господарських, побутових і санітарно-гігієнічних, рекреаційних потреб. Тільки для життєвих потреб людині щодоби потрібно 2,5 л чистої прісної води, а з урахуванням усіх інших її запитів витрати води на одну людину в промислово розвинених країнах становлять 300-600 л на добу. Задоволення попиту на воду в містах, на підприємствах і в селищах здійснюється шляхом влаштування централізованих систем водопостачання. Сучасний водопровід є системою складних споруд для видобування води, очищення її (якщо це потрібно), зберігання необхідних запасів і транспортування до споживача. Каналізація

складається з комплексу споруд для організованого відведення стічної рідини, очищення її і випуску в водоймище.

Правильне вирішення питань водопостачання і каналізації можливе лише в комплексній ув'язці з питаннями енергопостачання, газопостачання, транспорту та ін. Підземні джерела водопостачання також повинні мати три пояси зони санітарної охорони. Межі першого поясу зони санітарної охорони (строгого режиму) встановлюють залежно від ступеня захищеності водоносних горизонтів від забруднень з поверхні землі й гідрогеологічних умов на визначеній відстані від водозабору: для надійно захищених горизонтів - не менше 30 м; для недостатньо захищених горизонтів - не менше 50 м. Межі другого поясу встановлюють з розрахунку, що при мікробному забрудненні води час пересування води від межі до водозабору повинен бути 100- 400 діб. Третій пояс враховує хімічні забруднення джерела водопостачання.

Тривалість часу пересування хімічних забруднень має бути такою ж, як і тривалість експлуатації водозабору, але не менше 25 років. Обмеження і заборони в зонах санітарної охорони підземних джерел водопостачання такі ж, як і в зонах санітарної охорони поверхневих джерел водопостачання. Стан джерел водопостачання і якість питної води безпосередньо впливають на здоров'я населення. Так, за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), 25% населення постійно ризикує захворіти на хвороби, пов'язані із споживанням недоброякісної питної води. У країнах, що розвиваються, кожний третій мешканець страждає через брак питної води та необхідних санітарних умов – основних вимог для здорового і гідного життя. У цих країнах приблизно 80% всіх хвороб і 1/3 смертельних випадків спричинені споживанням забрудненої води. Оскільки чисельність населення на Землі безперервно збільшується, то невпинно зростають і потреби в чистій прісній воді, а отже, збільшується кількість стічних вод. Останні, потрапляючи в поверхневі й підземні джерела вод, забруднюють їх шкідливими токсичними домішками, небезпечними для життя людини, внаслідок чого скорочуються і

без того обмежені резерви прісної води. Людині потрібна чиста високоякісна прісна вода. Тому збереження і охорона водних ресурсів від виснаження – одна з найважливіших проблем людства, яка значно ускладнюється у зв'язку з урбанізацією людського суспільства, інтенсивним розвитком промисловості й сільського господарства, використанням різних хімічних препаратів у побуті й виробництві, що призводить до значного забруднення води і ґрунтів. Це перешкоджає вирощуванню екологічно безпечної харчової рослинної і тваринної продукції та сировини. Наслідком міграції токсичних компонентів у ґрунті є негативний вплив на здоров'я людей, що свідчить про потребу охорони природних вод від забруднення. Саме тому питання охорони і раціонального використання прісної води посідає чільне місце у програмах економічного і соціального розвитку всіх без винятку країн світу.

Водопостачання та водовідведення Особливе значення це питання має для України, яка за ступенем водозабезпечення займає одне з останніх місць серед країн Європи, а за водоемністю валового суспільного продукту випереджає їх. У результаті проведення відповідних робіт із захисту водних об'єктів від забруднення і раціонального використання водних ресурсів в Україні розроблені й освоюються нові високоефективні технології водопостачання та водовідведення. Це дало змогу значно скоротити забір води з природних водних джерел, об'єм утворюваних стічних вод, підвищити якість очищеної води й зменшити негативний вплив на навколишнє природне середовище. Для потреб країни (промисловості, сільського господарства, енергетики, населення) потрібна велика кількість води, яка б відповідала жорстким вимогам державного стандарту і технічним умовам споживачів. Вирішення цих важливих господарських завдань потребує ретельного вибору джерел водопостачання і будівництва високоефективних очисних споруд, систематичного й планомірного здійснення комплексних заходів щодо охорони від забруднення води, ґрунтів і повітря, очищення річок та річкових басейнів. Постанови і закони, прийняті Верховною Радою і урядом України, зокрема Загальнодержавна програма «Питна вода України»

на 2006-2020 рр, спрямовані на раціональне використання, економну витрату води й запобігання виснаженню водних резервів. При цьому наголошується на необхідності прискорення темпів будівництва водоохоронних об'єктів, збільшення потужності систем оборотного і повторного використання вод, розроблення і впровадження на підприємствах безстічних систем водокористування, поліпшення якості питної води. Великого значення надається охороні водних джерел від забруднення і виснаження та створенню автоматизованих систем управління водогосподарськими комплексами. На якість питної води централізованого постачання негативно впливає незадовільний технічний стан водопровідних мереж і споруд, несвоєчасне проведення їх капітальних, поточних та планово-профілактичних ремонтів, велика кількість аварій і затягування строків їх ліквідації. Зношеність технологічного обладнання становить в середньому 65-70%, понад 33% мереж знаходяться в аварійному стані і потребують негайної заміни. Крім того, незадовільний стан водопровідно-каналізаційних мереж призводить до повторного забруднення питної води. Вирішення проблеми забезпечення населення питною водою гарантованої якості можливе лише шляхом впровадження сучасних технологій, споруд, реагентів, матеріалів та обладнання, а також відновленням систем розподілу питної води.

## Розділ 1

### Моделювання гідродинаміки при наявності водобійної стінки

Розглядається скидання мінералізованих стічних вод зі сховища в акваторію р. Самара. Скидання стічних вод у акваторію планується проводити через трубу, розміщену поблизу дна. Для зниження інтенсивності забруднення акваторії планується використання водобійної стінки - перешкоди на шляху руху забрудненої струменя стічних вод.

Потік стічних вод, що виходить з труби, буде взаємодіяти з річковим потоком, і тому виникає задача розрахунку поля швидкості формується течії при такій взаємодії двох потоків.

Це поле швидкості буде робити визначальний вплив на розсіювання домішки і формування зони забруднення акваторії поблизу від водовипуску.

Введемо декартову систему координат і будемо розглядати процес взаємодії двох потоків всередині паралелепіпеда зі сторонами  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$ . Припустимо, що річкова вода і стічні води - нестискувані рідини, а протягом, що формується при взаємодії цих вод - потенційне. У цьому випадку вектор швидкості  $\vec{V}$  течії можна записати у вигляді [29, 32]

$$\vec{V} = \text{grad}P, \quad (1.1)$$

де  $P$  - потенціал швидкості.

Якщо перейти від цього виразу до покомпонентної записи, то отримаємо наступні залежності для розрахунку проєкцій вектора швидкості течії на осі декартової системи координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ :

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (1.2)$$

Якщо підставити залежності (1.2) в рівняння нерозривності [26]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

то отримаємо рівняння для визначення потенціалу швидкості [19, 26]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad (1.4)$$

У даній роботі рівняння Лапласа (1.4) буде тією гідродинамічною моделлю, на підставі якої виконується розрахунок поля швидкості течії, що виникає при взаємодії потоку стічних вод і річкового потоку.

Розглянемо граничні умови для рівняння Лапласа [26]:

на дні, верхній межі розрахункової області - вільної поверхні,–

і будь-якої твердої стінки ставиться умова:  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$  де  $n$ - одиничний

вектор зовнішньої нормалі до даної кордоні;

на вхідний кордоні розрахункової області (межа втікання річкового потоку):–

$$\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$$

де  $V_n$  – відоме значення швидкості потоку (профілю швидкості);

-на вихідний кордоні розрахункової області:  $P = P_0 + const$  (умовия Дирихле);

-на виході з скидний труби задається швидкість потоку стічних вод.

На підставі розглянутої гідродинамічної моделі здійснюється розрахунок поля швидкості течії (залежно 1.4) при взаємодії річкового потоку і потоку зворотних вод, а також при наявності водобійного стінки. Для проведення «пілотних» розрахунків в роботі буде використовуватися двовимірне рівняння для потенціалу швидкості. В цьому випадку, розрахунок буде виконуватися для профільної завдання, вісь  $Y$  для даного завдання буде направлена вертикально вгору.

Розрахунок поля швидкості є попереднім етапом для розрахунку формується в акваторії зони забруднення при скиданні промислових стоків.

Для розрахунку процесу забруднення акваторії річки при скиданні стічних вод використовується наступне рівняння [9, 8]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

, (2.5)

Де  $C$  – масова концентрація домішки у воді;

$u, v, w$  – компоненти вектора швидкості

;

$w_s$  - швидкість гравітаційного осадження домішки;

$\sigma$  - коефіцієнт хімічного розпаду домішки;

$\mu_x, \mu_y, \mu_z$  - коефіцієнти дифузії;

$t$  - час.

Рівняння (1.5) виражає в диференціальній формі закон збереження маси для домішки в потоці. Величина коефіцієнтів дифузії визначається з наступних співвідношень [39, 40]

$$\mu_x = 0,032 + 21,8u_m^2 \quad (2.6)$$

$$\mu_z = c_0 + c_1V + c_2H + c_3V^2 + c_4H^2 + c_5VH + c_6V^2H + c_7VH^2, \quad (2.7)$$

де  $c_i$  ( $i = 1, 2 \dots 7$ ) - емпіричні коефіцієнти, представлені в табл. 1.1;

$H$  - глибина;

$u_m$  - середня швидкість потоку.

Для розрахунку середньої швидкості потоку використовується залежність [9]

$$u_m = a_0 + a_1V + a_2H + a_3V^2 + a_4H^2 + a_5VH + a_6V^2H + a_7VH^2, \quad (2.8)$$

де  $V$  - швидкість вітру;

$a_i$  - емпіричні коефіцієнти.

Значення коефіцієнтів  $a_i$  ( $i = 1, 2 \dots 7$ ) представлені в табл. 2.1. Відзначимо, що наведені розрахункові залежності по визначенню коефіцієнтів дифузії і середньої швидкості потоку рекомендується використовувати для умов [39, 40]

$$2,0 \leq V \leq 20(\text{м/с}), 1,5 \leq H \leq 50(\text{м}).$$

Таблиця 1.1 Значення емпіричних коефіцієнтів

$V \leq 6\text{м/с}$	
$a_i$	$c_i$
$a_0 = 3,613 \cdot 10^{-2}$	$c_0 = 599 \cdot 10^{-4}$
$a_1 = -2,751 \cdot 10^{-3}$	$c_1 = 5,347 \cdot 10^{-4}$
$a_2 = 1,108 \cdot 10^{-2}$	$c_2 = -3,681 \cdot 10^{-4}$
$a_3 = 1,461 \cdot 10^{-3}$	$c_3 = -1,469 \cdot 10^{-4}$
$a_4 = 9,729 \cdot 10^{-6}$	$c_4 = 5,669 \cdot 10^{-6}$
$a_5 = -7,189 \cdot 10^{-3}$	$c_5 = 1,426 \cdot 10^{-4}$
$a_6 = 9,925 \cdot 10^{-4}$	$c_6 = 2,276 \cdot 10^{-6}$
$a_7 = -3,875 \cdot 10^{-6}$	$c_7 = -2,401 \cdot 10^{-6}$

Розглянемо крайові умови для рівняння (1.12).

На ділянці розрахункової області, куди входить річковий потік, ставиться умова [8]

$$C|_{\text{границя}} = Ct,$$

де  $C_m$  – відоме значення концентрації забруднювача. Для даної задачі про скидання стічних вод можна вважати, що значення «вхідний» концентрації дорівнює нулю.

На ділянці виходу потоку з розрахункової області в дискретній моделі ставиться «м'яке» гранична умова виду

$$C(i + 1, j, k) = C(i, j, k),$$

де  $i + 1, j, k$  - індекс разностной осередки, відповідної кордоні виходу потоку.

На дні і верхній межі ставиться гранична умова виду

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

де  $n$  - одиничний вектор зовнішньої нормалі до кордону.

У загальному вигляді початкова умова виглядає:, де

- відоме значення концентрації забруднювача в розрахунковій області на момент часу  $t = 0$ . Зокрема, можна вважати, що концентрація  $C_0$  дорівнює нулю.

Для проведення «пілотних» розрахунків за оцінкою розмірів зони забруднення річки та інтенсивності поширення забруднюючої речовини буде використовуватися двомірне модель масопереносу, що представляє собою осередненне по ширині розрахункової області рівняння (2.12) без доданка, що враховує гравітаційне осідання домішок. Для розрахунку процесу розведення стічних вод всередині водовипуску використовується осередненне по висоті скидного споруди рівняння (2.12) без доданка, що враховує гравітаційне осідання домішок [46, 48, 53].

Для вирішення гідродинамічної задачі (розрахунок поля швидкості) і завдання масопереносу (розрахунок розсіювання забруднювача в акваторії)

при скиданні стічних вод, а також для вирішення завдання про розбавлення стічних вод всередині водовипуску будемо використовувати метод сіток. Розрахунок буде виконуватися на прямокутній разностной сітці. Значення потенціалу швидкості  $P$  визначатимемо в центрах різницевих осередків, а компоненти вектора швидкості

- на гранях різницевих осередків.

Розрахунок поля швидкості і процесу розведення стічних вод всередині водовипуску реалізується в області складної геометричної форми. Для обліку цієї складної форми в численних моделях буде використовуватися метод маркування розрахункової області [14].

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа використовується ідея встановлення рішення по часу [29, 36]. Це означає, що чисельно інтегрується наступне рівняння еволюційного типу

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2},$$

де  $\eta$  - фіктивне час.

Як відомо, при  $\eta \rightarrow \infty$  рішення даного рівняння прагне до «встановлення», тобто до вирішення рівняння Лапласа.

Для еволюційного рівняння можна записати наступну різницеву схему (метод

Річардсона [17, 23])

$$P_{ijk}^{n+1} = P_{ijk}^n + \frac{P_{i+1,j,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} +$$

$$+ \frac{P_{i,j,k+1}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}.$$

На основі цієї залежності здійснюється розрахунок значення потенціалу швидкості в осередках, відповідних області водного потоку.

Особливістю даної схеми є те, що невідоме значення величини потенціалу швидкості  $P$  визначається по явною схемою. Для початку розрахунку задається початкове поле потенціалу швидкості. Сам розрахунок припиняється при виконанні умови виду

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

де  $\varepsilon$  - мале число (наприклад, 0,001);

$n$  - номер ітерації (крок по фіктивному «часу»).

Для реалізації в чисельній моделі граничного умови непротекання на твердих стінках використовуються фіктивні осередки.

На підставі розрахованого поля потенціалу швидкості визначаються компоненти вектора швидкості течії на гранях різницевих осередків

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x},$$

$$v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y},$$

$$w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}.$$

Для чисельного інтегрування 2D рівняння Лапласа використовується метод умовної апроксимації Різницеві рівняння на кожному кроці розщеплення записуються так:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

На кожному кроці розщеплення невідоме значення потенціалу швидкості визначається по явною формулою біжить рахунку. Розрахунок припиняється при виконанні умови:

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

де  $\varepsilon$  - мале число (наприклад,  $\varepsilon = 0.001$ );  $n$  - номер ітерації.

Значення компонент вектора швидкості течії для двомірної задачі визначається так:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x},$$

$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Розрахунок компонент вектора швидкості на гранях різницевих осередків дає можливість побудувати консервативну різницеву схему для рівняння розсіювання забруднювача в річковій воді.

Для чисельного інтегрування тривимірного рівняння переносу домішки в акваторії річки використовується рівняння масо переносу.

Зробивши в цьому рівнянні заміну  $w = w - ws$ , розглянемо неявну поперемінно - трикутну різносту схему для його чисельного інтегрування [14].

Замінімо похідну за часом розділеної різницею «назад»

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

Конвективні похідні запишемо у вигляді:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$\frac{\partial w C}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

где

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; u^- = \frac{u - |u|}{2}; v^+ = \frac{v + |v|}{2}; v^- = \frac{v - |v|}{2}; w^+ = \frac{w + |w|}{2}; w^- = \frac{w - |w|}{2}.$$

Апроксимацію конвективних похідних зробимо за такими залежностями:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1},$$

де

$$L_x^+ = \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}}{\Delta x}, L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x}, L_y^+, L_y^-, L_z^+, L_z^-$$

позначення різницевих операторів.

Для апроксимації другі похідних використовуємо такі залежності

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1} \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} \\ \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) &\approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{ijk}^{n+1}}{\Delta z^2} - \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{ij,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1} \end{aligned}$$

У цих виразах

$$M_{xx}^+ = -\mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}, M_{xx}^- = \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}, M_{yy}^+, M_{yy}^-, M_{zz}^+, M_{zz}^-$$

– позначення різницевих операторів для апроксимації других похідних.

Таким чином, рівняння переносу можна записати тепер так

$$\begin{aligned} \frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + L_z^+ C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} + \sigma C_{ijk}^{n+1} = \\ = \left( M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1} + M_{zz}^- C^{n+1} \right) \end{aligned}$$

Виконаємо розщеплення вирішення цього різницевого рівняння при інтегруванні на тимчасовому інтервалі  $dt$  наступним чином:

на першому кроці розщеплення

$$k = \frac{1}{4} + n:$$

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j,k}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n + M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n), \end{aligned} \quad (1.9)$$

на другому кроці розщеплення

$$k = n + \frac{1}{2}; \quad c = n + \frac{1}{4}:$$

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j,k}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^c), \end{aligned} \quad (1.10)$$

на третьому кроці розщеплення  $k = n + \frac{3}{4}; \quad c = n + \frac{1}{2}$  використовується

формула (1.10);

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

формула (1.9).

Початкова умова для кожного рівняння, на кожному кроці розщеплення записується у вигляді

$$\begin{aligned} C \Big|_{t=t^n}^1 &= C(x, y, z, t^n) \\ C \Big|_{t=t^n}^k &= C \Big|_{t=t^{n+1}}^{k-1}, \quad k = 2, 3, 4 \end{aligned},$$

де  $C^1, C^k$ , - значення концентрації домішки на певному розрахунковому кроці.

Особливістю розглянутої різницевої схеми є те, що розрахунок невідомого значення концентрації  $C$  на кожному кроці розщеплення визначається по явною формулою біжить рахунку, але схема при цьому є абсолютно стійкою.

Для чисельного інтегрування двомірного рівняння переносу домішки поперемінно - трикутна різницева схема будується наступним чином [10].

Похідна за часом апроксимується розділеної різницею «назад»

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Конвективні похідні представимо в такий спосіб:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

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

Виконаємо апроксимацію конвективних похідних розділеними різницями «проти потоку»

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1} \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1} \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1} \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}\end{aligned}$$

где  $L_x^+$ ,  $L_x^-$ ,  $L_y^+$ ,  $L_y^-$  – прийняте позначення різницевого операторів.

Для апроксимації других похідних використовуємо такі вирази

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.\end{aligned}$$

где  $M_{xx}^+$ ,  $M_{xx}^-$ ,  $M_{yy}^+$ ,  $M_{yy}^-$  – прийняті позначення різницевого операторів.

Використовуючи введені позначення різницевого операторів, запишемо різницевий аналог диференціального рівняння переносу домішки

$$\begin{aligned}\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1})\end{aligned}$$

Виконаємо розщеплення даного різницевого рівняння на чотири різницевого рівняння так, щоб на кожному кроці враховувалося лише один напрям перенесення домішки, обумовлене знаком при конвективних похідних [105]:

на першому кроці розщеплення

$$k = n + \frac{1}{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k &= \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l \end{aligned}, \quad (1.11)$$

на другому кроці розщеплення

$$k = n + \frac{1}{2}; c = n + \frac{1}{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k &= \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l \end{aligned}, \quad (1.12)$$

на третьому кроці розщеплення

$$k = n + \frac{3}{4}; c = n + \frac{1}{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k &= \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l \end{aligned}, \quad (1.13)$$

на четвертому кроці розщеплення

$$k = n + 1; c = n + \frac{3}{4}$$

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l \end{aligned} \quad (1.14)$$

Відзначимо, що, як і для тривимірної задачі, значення концентрації домішки на кожному кроці розщеплення визначається по явній схемою біжить рахунку.

Початкова умова для кожного різницевого рівняння записується так

$$C^1 \Big|_{t=t^n} = C(x, y, z, t^n), \quad C^k \Big|_{t=t^n} = C^{k-1} \Big|_{t=t^{n+1}}.$$

Для забезпечення граничної умови  $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$  на твердих стінках використовуються фіктивні різницеві осередки. На кордоні виходу потоку реалізується «м'яке» гранична умова виду

$$\backslash$$

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

де  $(i+1, j)$  - номер разностной осередки на виході з розрахункової області.

Розглянуті чисельні моделі допускають дуже легку програмну реалізацію.

## Розділ 2

### Експериментальне дослідження

В цьому розділі представлені результати експериментів по моделюванню скидання стічних вод в річку за наявності водобойної стінки. Скидання стічних вод в акваторію планується реалізувати через скидну трубу, розміщену на відстані 12 м від берега. Скидання здійснюватиметься на глибині до 3.4 м. Витрата стічних вод через трубу, режим скидання, діаметр труби вважаються відомими. Фізичне моделювання процесу скидання мінералізованих стічних вод в цій роботі проводилося в гідравлічному лотку (рис. 2.1). Ширина лотка - 13 см, довжина - 1,7 м, глибина води в лотку складала 9,3 см. Моделювання здійснювалося по числу Фруда і числу Архімеда [8, 14], тобто

$$F_r = \frac{V^2}{gL} = idem, \quad (2.1)$$

$$A_r = \frac{gL}{V^2} \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1} = idem, \quad (2.2)$$

де  $V$  - характерна швидкість;  $\rho_1, \rho_2$  - щільність середовища, що несе, і стічних вод, що скидаються;  $L$  - характерний лінійний розмір.

$$V_M = \frac{V_H}{\sqrt{\alpha}}, \quad (2.3)$$

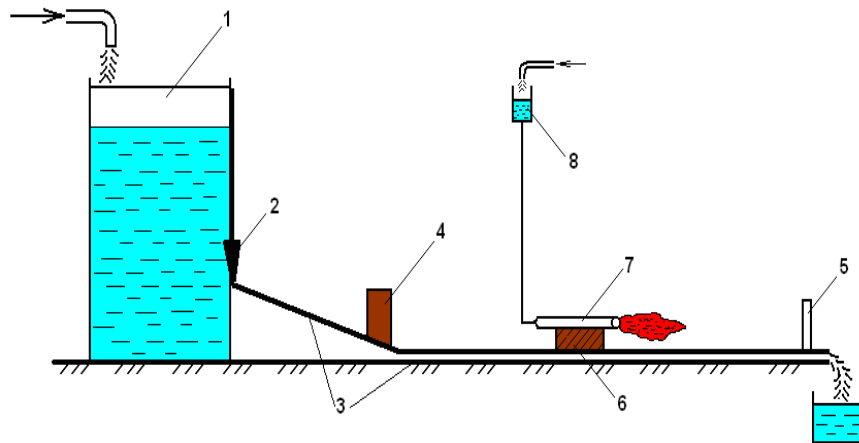


Рисунок 2.1. Схема розташування устаткування: 1 - резервуар; 2 - затвор; 3 - лоток; 4 - водозлив практичного профілю; 5 - водозлив з тонкою стінкою; 6 - ложемент; 7 - скидна труба; 8 - бачок для подання мінералізованої води.

В якості характерного лінійного розміру прийнятий діаметр скидної труби  $d_n = 1.2$  м, а за характерну швидкість прийнята швидкість в скидній трубі  $V_n = 1,5$  м/с. Моделювання проводилося в масштабі 1: 100, таким чином, діаметр скидної труби на моделі склав  $d = 1$  см Швидкість в скидній трубі на моделі повинна задовольняти умову (згідно з критерієм Фруда) де - лінійний масштаб; індекс "н" відноситься до параметрів натури, а індекс "м" - до моделі. Річкова вода і стічні води мають різну щільність. Тому при проведенні фізичного експерименту необхідно врахувати цю особливість. Цей облік здійснюється шляхом забезпечення рівності числа Архімеда для моделі і натури. Для забезпечення виконання критерію Архімеда мінералізація вод, що скидаються", при проведенні експерименту складала величину 30 г/л, оскільки вода, що подається в лоток і моделює середовище, що несе, - "річку", бралася з системи питного водопостачання. Для забезпечення цього рівня мінералізації у воду, що скидається, додавалася відповідна кількість кухарської солі. При проведенні експерименту вимірювалася концентрація солі на довжені 8см від місця скиду, на довжені

14см та на довжені 22см від місця скиду. Вимір здійснювалася на глибині 9см. Таки виміри здійснювалися для визначення ефективності роботи стінки як захисної споруди.



Рисунок 2.2. Гідралічний лоток в лабораторії

На рис. 2.3 показана підготовка лотка до експерименту.



Рисунок 2.3 Підготовка лотка до експерименту

Результати експериментальних досліджень показані далі на рисунках, де представлено фото зони забруднення водного середовища за наявності водобойного колодязя. Висота розташування скидної труби над дном лотка - 2.5 см.

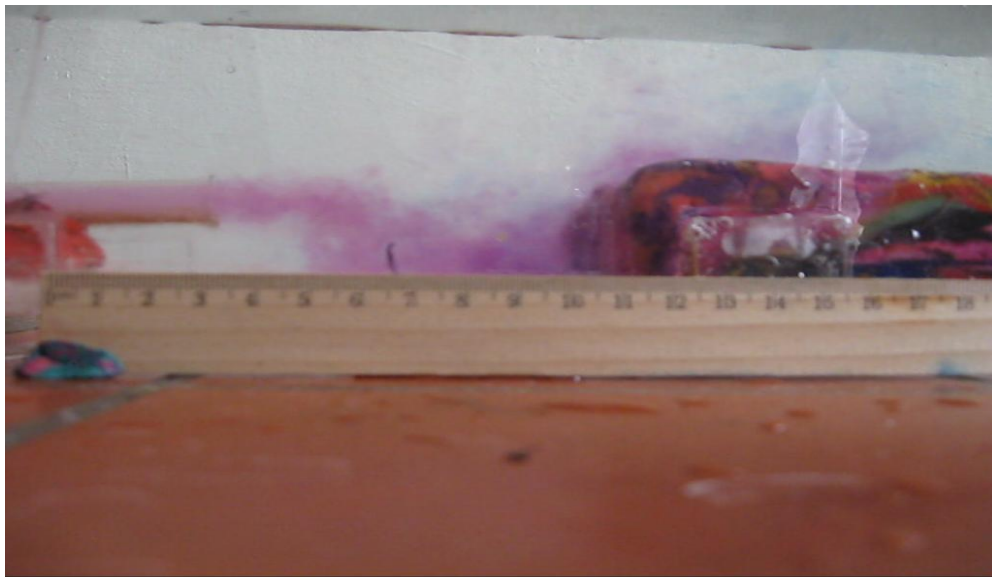


Рисунок 2.4. Зона забруднення за наявності водобойної стінки

При проведенні експерименту висота водобійної стінки склала 6.2 см. Як ми бачимо з рисунку, водобійна стінка грає роль перешкоди на шляху забрудненого струменя стічних вод. Це видно за кольором фарби струменя перед стінкою - колір дуже насичений, тобто відбувається накопичення домішки перед стінкою. Також видно, що колір струменя над стінкою - менш насичений, тобто домішка рухається над стінкою з меншою концентрацією, що сприяє зниженню техногенного навантаження на акваторію річки.

Далі в таблицях наведені значення концентрації солі в різних точках виміру за місцем скиду для різної швидкості потоку.

Таблиця 2.1 Концентрація солі на різній відстані від скиду.

Сценарій	L=8см від джерела забруднення (нема стінки)	L=8см від джерела забруднення (є стінка)	L=14см від джерела забруднення (нема стінки)	L=14см від джерела забруднення (є стінка)
Швидкість 1.5см/с	22мг/л	28мг/л	16мг/л	12мг/л
Швидкість 3см/с	18мг/л	24мг/л	14мг/л	9мг/л

Таблиця 2.2 Концентрація солі на різній відстані від скиду.

Сценарій	L=22см від джерела забруднення (нема стінки)	L=22см від джерела забруднення (є стінка)
Швидкість 1.5см/с	12мг/л	4мг/л
Швидкість 3см/с	5мг/л	2мг/л

Дані таблиць свідчать про те, що перед стінкою концентрація домішки збільшується, а з стінкою – зменшується. Тобто, стінка грає суттєво заисну функцію.

## Розділ 3

### Теоретичне дослідження ефективності роботи стінки

Розглядається вірогідне скидання шахтних вод з шахти «Герої Космоса» в р. Самара через водовипуск і за наявності водобойної стінки. Розрахунок виконується на базі розглянутої раніше математичної моделі.

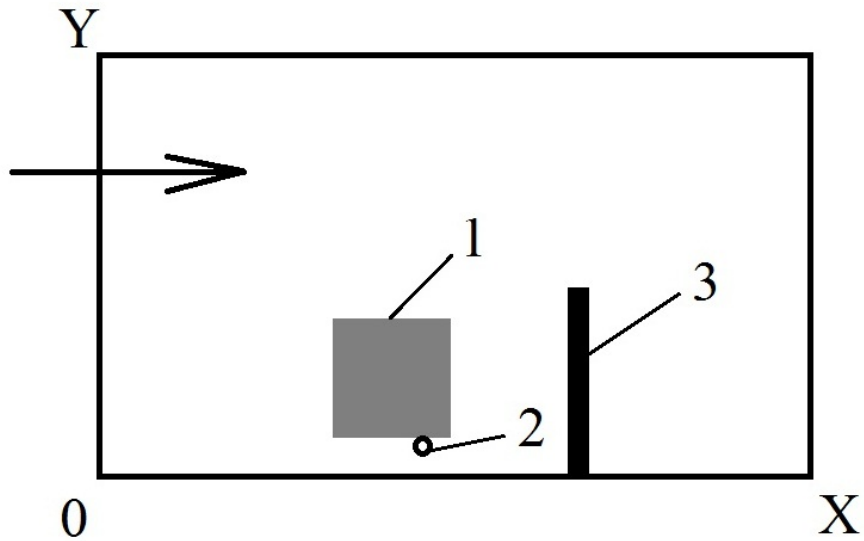
Для більшої наявності уявлення нізче наведена розрахункова схема для кожного сценарія:

1. сценарій #1, базовий варіант – тільки вертикальна стінка в акваторії (рис.3.1).

2. сценарій #2 – вертикальна стінка, що має додатковий елемент, котрий розташований на підвітряному боці стінки та має довжину 1м (сценарій #2) або довжину 2м (сценарій #2а). Висота установки додаткового елемента 3.5м. (рис. 3.2).

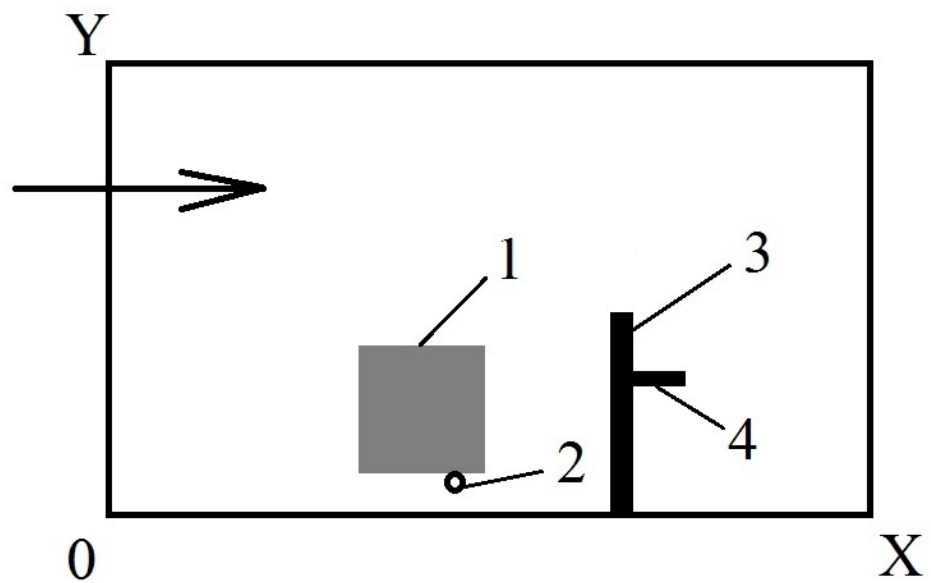
3. сценарій #3 – вертикальна стінка, що має два додаткових елементів: перший розташований на підвітряному боці бар'єру та має довжину 2м; висота установки цього додаткового елемента 3.5м. Другий додатковий елемент розташований на навітряному боці стінки та має довжину 1м (короткий елемент, сценарій #3), або 2м (довгий елемент, сценарій #3а); висота установки цього додаткового елемента 5м. (рис. 3.3).

4. сценарій #4 – вертикальний бар'єр має додатковий елемент розташований на підвітряному боці стінки під кутом  $45^{\circ}$  та має довжину 2м. Висота установки додаткового елемента 5м. (рис. 3.5).



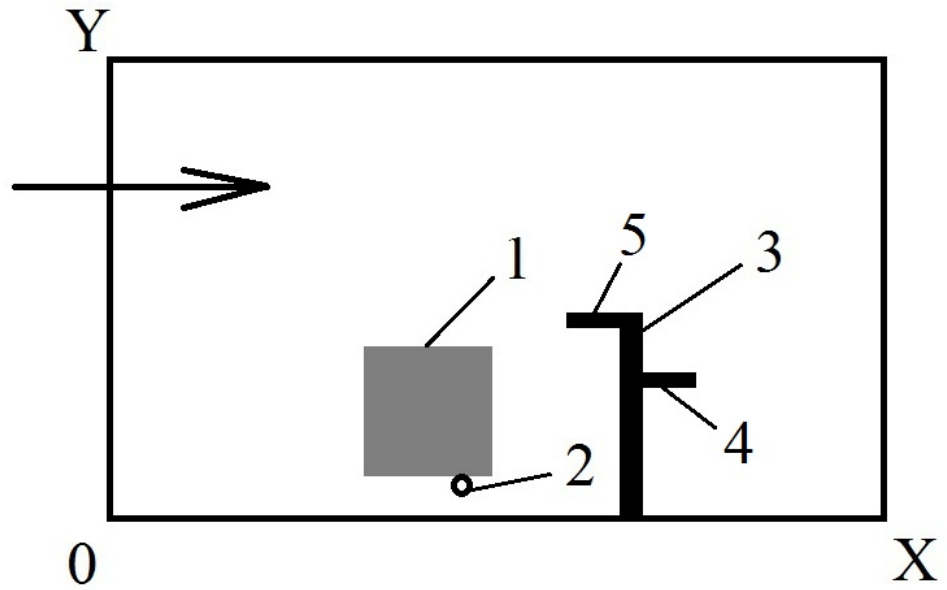
1 – джерело викиду (труба) ; 2 – місце емісії; 3 - стінка

Рисунок 3.1 – Схема розрахункової області (сценарій #1, базовий варіант)



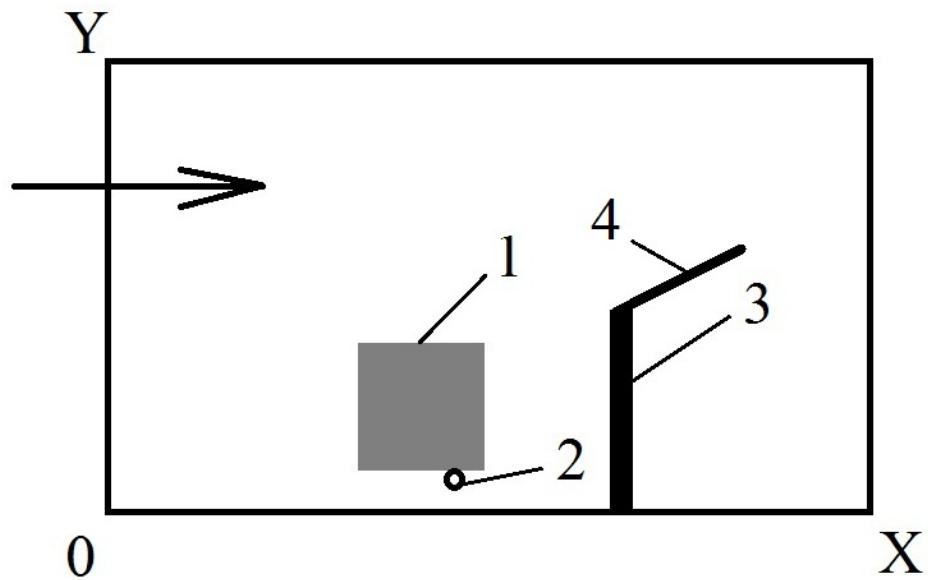
1 – джерело скиду; 2 – місце емісії ; 3 - стінка; 4 – додатковий елемент

Рисунок 3.2 – Схема розрахункової області (сценарій #2)



1 – джерело скиду; 2 – місце емісії; 3 - стінка; 4 – додатковий елемент; 5 –  
додатковий елемент

Рисунок 3.3 – Схема розрахункової області (сценарій #3)



1 – джерело скиду; 2 – місце емісії; 3 - стінка; 4 – додатковий  
елемент;

Рисунок 3.4 – Схема розрахункової області (сценарій #4)

Ніжче, на рисунках показано зону забруднення для де-кілько сценарієв задачі.

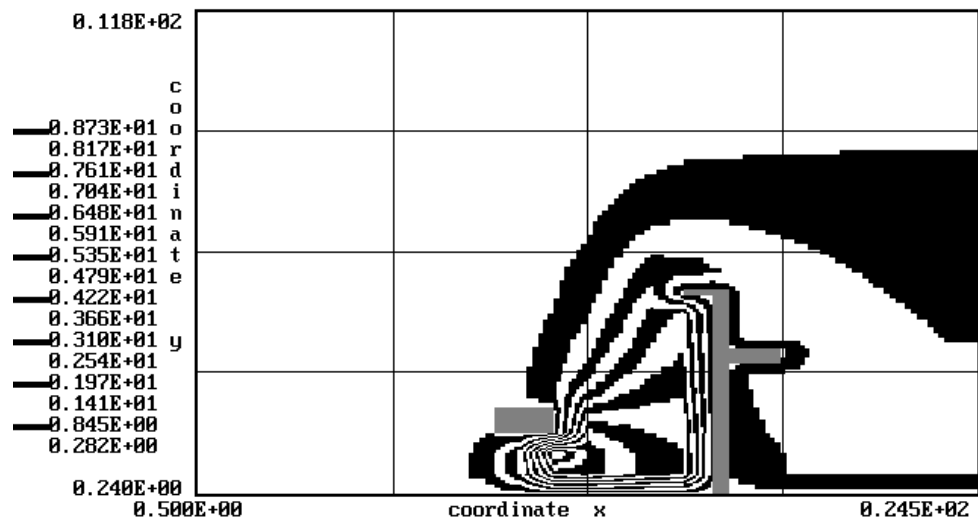


Рисунок 3.5 – Зона забруднення (сценарій #3, короткий додатковий елемент на навітряному боці)

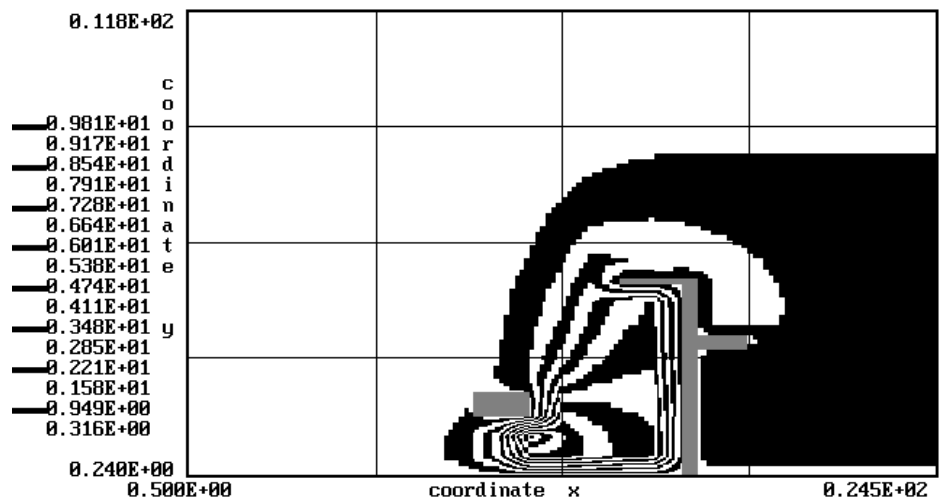


Рисунок 3.6 – Зона забруднення (сценарій #3а, довгий додатковий елемент на навітряному боці)

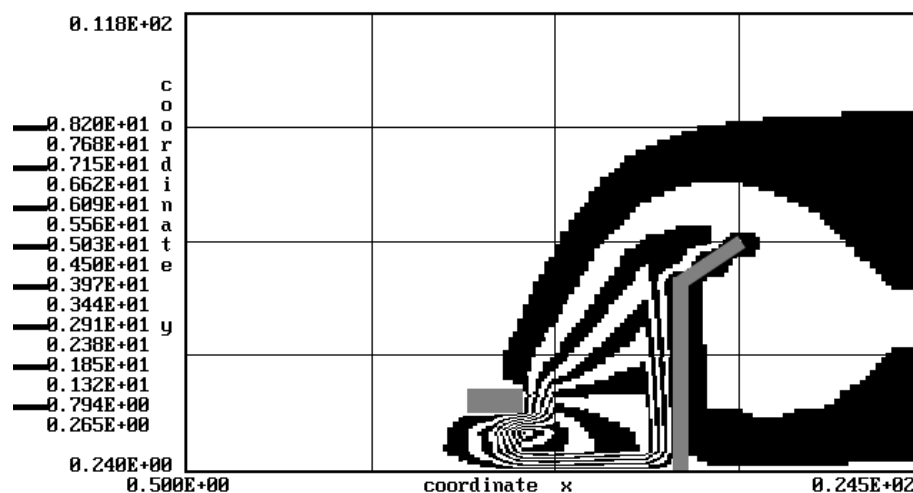


Рисунок 3.7 – Зона забруднення (сценарій #4)

Аналіз даних рисунків, показує, що додаткові елементи на стінке впливають на форму області забруднення, а значить – на інтенсивність забруднення акваторії. Для оцінки цього впливу в табл. 2.2 наведено безрозмірне значення концентрації солі в точці, що знаходиться на висоті 1.6м та довжині 3м від стінки, на підвітряному боці.

Таблиця 3.2 Концентрації солі, кг/л (розрахунок)

сценарій	Сценарій #1, базовий	сценарій #2	сценарій #2а	сценарій #3	сценарій #3а	сценарій #4
Концентрація	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$9.1 \cdot 10^{-3}$	$8.6 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$

Аналіз даних з цієї таблиці показує, що найбільш прийнятними варіантами є сценарій #3а та сценарій #4.

Таким чином, проведений обчислювальний експеримент підтвердив, що застосування водобійного колодязя дозволяє зменшити інтенсивності забруднення акваторії річки при скиданні стічних вод.

## **Висновки:**

1. Зроблена експериментальна установка для проведення дослідження процесу забруднення поверхневого джерела водопостачання.
2. Проведені експериментальні дослідження по оцінці ефективності використання водобійної стінки для захисту поверхневих вод від забруднення.
3. Експериментальні дослідження показали, що концентрація домішки перед водобійною стінкою збільшується, але за стінкою – вона зменшується. Тобто, стінка виконує захисну функцію для водотоку.
4. На базі математичної моделі проведено обчислювальний експеримент по визначенню ефективності використання водобійної стінки з додатковим елементом.

## Список використаних джерел

1. Кравчук О.А. Дослідження гідравлічного опору завантаження фільтрів// Проблеми водопостачання ,водовідведення та гідравліки К.:КНУБА,2016.- Вип.27.-С.208-213.
2. 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.
3. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження зміни швидкості фільтрування під час роботи швидкого фільтра // Містобудування та територіальне панування К.:КНУБА,2017.- Вип.64.-С135-141.
4. 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.
5. Экологически чистые подземные питьевые воды (минеральные природные столовые). Рекомендации по обоснованию перспективных участков для добычи с целью промышленного розлива. - М.: ГИДЭК, 1998.-32 с.
6. ДсанПіН. Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання. - Затв. наказом МОЗ України № 383 від 23.12.1996 р.
7. Кульский Л.А. Основы химии и технологии воды. - К.: Наукова думка, 1991.- 348 с.
8. Колотило В.Д., Намяк Д.Є. Технології кондиціонування питної води. - Х.: Основа, 2006. - 208 с.
9. Бабенков Е.Д. Очистка воды коагулянтами. - М: Наука. 1977.-356 с.
10. Колотило В.Д., Орлов В.О. Зернистые фильтры для подготовки питьевой воды. - Х.: Основа, 2004. - 256 с.
11. Гончарук В.В., Потапченко Н.Г. Современное состояние проблемы обеззараживания воды // Химия и технология воды. - 1998. - №2 —Т. 20. —С. 190-216.

12. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. - М., 1985. - 136 с.
13. Правила безпеки при виробництві, зберіганні, транспортуванні та застосуванні хлору (ПБХ-93). - К., 1995. - 56 с.
14. Когановский А.М. Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод. - К.: Наукова думка, 1983. - 256 с.
15. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. М.:Стройиздат, 1982.-440 с.
16. Бабенков Е.Д. Очистка воды коагулянтами. - Мл Наука, 1977.-356 с.
17. Когановский А.М. Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных ВОД. - К.. 1983. - 256 с.
18. Мякншев В.А. Модернизация коммунальных систем водоснабжения и водоотведения. - Симферополь:НАПКС, 2005.-200 с
19. Кульский Л. А., Строкам П.Г1. Технология очист- природных вод. -К.: Вища шк., 1986. - 352 с.
20. Николадзе Г.И., Минц Д.М., Кастальский А.А. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения. - М.: Высш. шк., 1984. - 368 с.  
Николадзе Г.И. Технология очистки природных вод: учеб, для вузов. - М.: Высш. шк., 1987. - 479 с.
21. Орлов В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. - Рівне: НУВГП, 2005.- 163 с.
22. Орлов В.О. Знезалізнення підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням. Монографія - Рівне: НУВГП, 2008. -158 с.
23. Орлов В.О. Пінополістирольні фільтри в технологічних схемах водопідготовки. - Рівне: РДТУ, 1999. - 144 с.
24. Орлов В.О., Мартинов С.Ю., Зошук А.М. Проектування станцій прояснення та знебарвлення води.-Рівне: НУВГП, 2007.-252 с.
25. Теоретические основы очистки воды: учебное пособи' Н.И.Куликов, А.Я.Найманов, Н.П.Омельченко, В.Н.Чернышев. Донецк: изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2009. - 298 с.

- 26.Тугай А.М., Терновцев В.О., Тугай Я.А. Розрахунок і проектування споруд систем водопостачання: Навчальний посібник. — К.:КНУБА, 2001.-254 с.
- 27.Тугай А.М., Тугай Я.А. Водопостачання. Джерела і водозабірні споруди. - К.: УФІМіБ, 1998. - 192 с.
- 28.Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. -К.: Аграрна наука, 2008. - 534 с.
- 29.Яцик А.В., Грищенко Ю.М., Волкова Л.А., Пащенко І.А. Водні ресурси: використання, охорона, відтворення, управління: Підручник для студентів ВНЗ. - К.: Генеза, 2007. - 360 с.
- 30.Яцик А.В. Водогосподарська екологія — у чотирьох томах, семи книгах. - К.: Генеза, 2004. - т.3, кн.5. - 496 с.