

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 Ліквідація області забруднення в зоні аерації на станції Пологи

Керівник магістерської роботи      доц. Машихіна П.Б.

Студент      Крюков Анатолій Андрійович

Дніпро  
2020 р.

Анотація

Вступ

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМА ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ЗОНИ АЕРАЦІЇ І  
ПІДЗЕМНИХ ВОД ПРИ АВАРІЯХ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ  
ТРАНСПОРТІ

1.1. Чинники, сприяючі інтенсивному забрудненню ґрунтових вод при  
аварійних розливах

1.2. Склад ландшафтних гідрогеологічних комплексів

1.3. Природоохоронні заходи для захисту ґрунтових вод.

1.4. Види захисту ґрунтових вод

РОЗДІЛ 2 ВІДОМОСТІ ПРО СТАНЦІЮ ПОЛОГИ

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ

3.1. Моделювання геомиграції

РОЗДІЛ 4 ПРОЦЕС ВЕРТИКАЛЬНОЇ ПРОМИВКИ ҐРУНТУ  
НЕЙТРАЛІЗУЮЧИМИ РОЗЧИНАМИ

Висновок

Список використаних джерел

## АНОТАЦІЯ

При транспортуванні рідинних вантажів, у випадку аварійних ситуацій, можливе інтенсивне забруднення зони аерації та з часом підземних вод. Тому важливою проблемою є прогнозування динаміки забруднення зони аерації з метою визначення часу, коли забруднювач досягне рівня підземних вод. Дуже важливою проблемою є розробка методів ліквідації областей забруднення в зоні аерації. Для цього потрібні спеціальні математичні моделі, що дозволяють визначити ефективність методів, що використовуються для захисту зони аерації та підземних вод.

**Мета роботи** - розробка чисельної моделі та проведення фізичного експерименту для аналізу динаміки забруднення зони аерації при аварійних розливах.

**Об'єкт дослідження** – процес поширення домішки в зоні аерації .

**Предмет дослідження** - забруднення зони аерації, підземних вод внаслідок аварії біля залізничної станції Пологи

**Методи дослідження** – математичне моделювання, фізичний експеримент

**Практичне значення** - розроблена ефективна модель для оцінки процесу забруднення зони аерації та підземних вод при аварійних розливах на залізнице.

**Ключові слова** – аварійний розлив, забруднення підземних вод, забруднення зони аерації, обчислювальний експеримент.

## Abstract

When transporting old vantages, in case of emergency situations, it is possible to intensively obstruct the zones and aeration with an hour of underground waters. Therefore, it is an important problem to predict the dynamics of the obstruction of the zone and the air at the same time, if the weather is not too close to the ground waters. An even more important problem is the development of methods for the liquidation of areas of obstruction in the zone of aeration. For a wide range of

special mathematical models, which allow the most effective methods to be used for capturing the zone of aeration and underground waters.

**Goal** - development of a numerical model and carrying out a physical experiment for the analysis of the dynamics of the obstruction of the zone of air during emergency bottling.

**Object** - the process of expanding the house in the zone of air.

The subject of the advance is the obstruction of the zone of air, underground waters during the avarium of the land-based station of Pologa

**Methods** - mathematical model, physical experiment

Practically significant - an effective model has been broken down for assessing the process of obstruction of the zone of air and ground waters during emergency bottling at the zaliznitsa.

**Key words** - emergency filling, obrudneniya underground waters, obrudneniya zone and aeration, numerical experiment.

## ВСТУП

Масштабні забруднення мають місце при аварійних розливах на транспорті. Україна володіє добре розвиненою мережею залізниць (рис.1.) по яких здійснюється перевезення вантажів в дуже великих об'ємах. Залізничного транспорту країни припадає на частку порядку 64% всіх вантажів, що перевозяться. небезпечні вантажі можуть складати близько 20% від загального об'єму перевезень. При цьому серед небезпечних вантажів знаходиться багато рідких вантажів.

Так щодня на залізницях здійснюється заправка 140-160 цистерн, а в дорозі щодня знаходиться до 1000 цистерн. В середньому, щорічно на залізниці відбувається близько 300-350 аварій. Аварії при транспортуванні рідких вантажів здатні викликати інтенсивне забруднення зони аерації і підземних вод різними забруднювачами (неорганічні кислоти, нафтопродукти і так далі). Необхідно мати на увазі, що при аваріях на залізничному транспорті завжди відбувається схід не менше 9-10 цистерн, тобто розмір емісії – не менше 600 тонн рідкого вантажу. Так, наприклад, аварійний схід 14 цистерн з сірчаною кислотою на вихідній стрілці станції Вольногорськ (1999 рік) привів до вельми масштабного забруднення ґрунту. Рятувальні роботи ускладнювалися таким, що захаращується забрудненої зони розкиданими цистернами. На ліквідацію наслідків аварії пішло більше 5 діб.

Метою данної дипломної роботи є фізичне та математичне моделювання процесу нейтралізації з області забруднення в зоні аерації після аварійного розливу кислоти  $H_2SO_4$ .

В результаті фізичного експерименту визначена величина коефіцієнту фільтрації при подачі лужності в ґрунт з кислотою. На основі метода математичного моделювання досліджена динаміка процесу нейтралізації кислоти в зоні аерації.

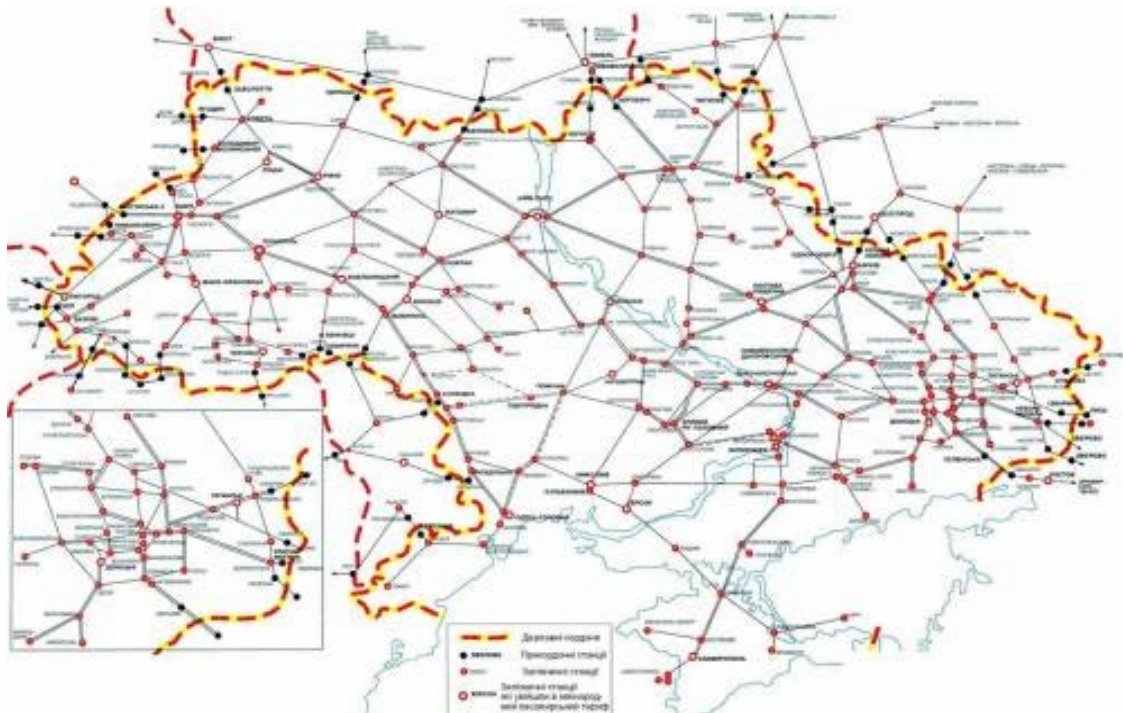


Рисунок 1 - Схема залізниць України

## **РОЗДІЛ 1**

### **ПРОБЛЕМА ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ЗОНИ АЕРАЦІЇ І ПІДЗЕМНИХ ВОД ПРИ АВАРІЯХ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

Забруднення зони аерації і ґрунтових вод має місце при функціюванні різноманітних виробництв (гірничодобувний комплекс, заводи хімічної промисловості і т.д.).

Масштабне забруднення зони аерації і ґрунтових вод відбувається при аваріях на залізничному транспорті. Таке забруднення характеризується наступними особистостями:

- разовий і значний об'єм емісії забруднювача при аварії;
- значний об'єм забрудненого ґрунту і забруднення, практично завжди, ґрунтових вод;
- наявність чинників, що перешкоджають швидкій організації і проведенню природоохоронних заходів (віддаленість місця аварії, наявність розкиданих цистерн, вагонів, що перешкоджають підходу і розгортанню техніки, складний рельєф, лісопосадки).

#### **1.1. Чинники, сприяючі інтенсивному забрудненню ґрунтових вод при аварійних розливах .**

При аваріях на залізничному транспорті завжди відбувається масштабне забруднення зони аерації, оскільки розлив має місце на не захищені ділянки ґрунту і протягом достатнього короткого проміжку часу велика маса рідкого вантажу витікає з пошкоджених цистерн. З часом забруднювач із зони аерації поступає в ґрунтові води.

Інтенсивному забрудненню ґрунтових вод при аварійних розливах «сприяє» ряд чинників, а саме, слабка захищеність ґрунтових вод і їх високе стояння в багатьох регіонах України. Через ці чинники рідкий вантаж з поверхні землі досить швидко проходить зону аерації і потрапляє в ґрунтові води,

утворюючи масштабні вогнища забруднення. У табл. 1.1 представлена інформація про структуру зон аерації для різних регіонів України [15, стр 74]. Як видно з цієї таблиці в багатьох регіонах ґрунтові води є слабо захищеними – зона аерації складається з ґрунтів з достатньо хорошою провідністю. Це означає, що при масштабних аварійних розливах відбудеться не тільки забруднення зони аерації, але і ґрунтових вод.

## 1.2. Склад ландшафтних гідрогеологічних комплексів

Таблиця 1.2.

| Номер серії ЛГГК           | Опис і поширення                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1a(1)<br>I * <sup>17</sup> | (n) <sup>*18</sup> Зона аерації і водовмісна товща складені торфами та мулом, що підстеляються крейдяно-мергельною товщею. Поширеній лише у Волинській та Рівненській областях.                                                    |
| 1б(2)I                     | (п) Зона аерації і водовмісна товща складені торфами та мулом, що підстеляються глинистими породами кору вивітрювання та кристалічними породами. Має місце лише у Житомирській області.                                            |
| 2a(3)<br>3                 | (п-т-к) Зона аерації складена торфами і мулом. Водовмісні породами є торфи з мулом, піски з прошарками супісків, суглинків і глин та тріщинуваті (закарстовані) крейдяно-мергельні відклади. Водотрівка товща представлена глинами |

<sup>\*17</sup> Бал ризику виникнення надзвичайних ситуацій внаслідок забруднення ґрунтових вод у межах поширення ЛГГК визначається фільтраційними властивостями товщі порід зони аерації.

<sup>\*18</sup> Породи-колектори водовмісної товщі за характером порожнин поділяються на чотири типи: порові (п), тріщинні (т), порово-тріщинні (п-т) та тріщинно-карстові (т-к).



|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | <p>(зона замулювання) або слабкотріщинуватою мергельно-крейдяною товщею.</p> <p>Поширеній у Волинській, Рівненській, Львівській, Чернігівській, Полтавській, Вінницькій, Хмельницькій, Одеській і Тернопільській областях.</p>                                                                                                              |
| 26(4)3 | <p>(п-т) Зона аерації складена торфами і пісками. Водовміснімі породами є піски з поєднанням гальки та гравію і з прошарками суглинків та тріщинуваті породи кори вивітрювання. Водотрівка товща представлена каолінами та щільними кристалічними породами. Має місце у Рівненській, Житомирській, Вінницькій та Хмельницькій областях.</p> |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3а(5)<br>5 | <p>(п) Зона аерації і водовмісна товща цілком однорідні й складені пісками (іноді черепашником іноді з прошарками суглинків), підстеляються глинистими або мергельно-крейдяними відкладами. Найбільш схильний до забруднення.</p> <p>Один з найбільш поширених ЛГГК.</p> <p>Має місце у Київській, Чернігівській, Сумській, Вінницькій, Херсонській, Миколаївській, Харківській, Донецькій, Львівській і Луганській областях та АР Крим.</p> |
| 3б(6)5     | <p>(п) Зона аерації і водовмісна товща цілком однорідні і складені пісками, які підстеляються каолінами та щільними кристалічними породами. Найбільш схильний до забруднення.</p> <p>Поширеній лише у Вінницькій та Хмельницькій областях.</p>                                                                                                                                                                                               |
| 4а(7)<br>4 | <p>(п) Зона аерації і водовмісна товща складені пісками з прошарками суглинків, супісків та глин, які підстеляються різновіковими глинами або крейдяно-мергельними породами.</p>                                                                                                                                                                                                                                                             |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>Один з найбільш поширених в Україні ЛГГК.</p> <p>Трапляється у Волинській, Рівненській, Житомирській, Київській, Чернігівській, Сумській, Полтавській, Черкаській, Кіровоградській, Дніпропетровській, Запорізькій, Донецькій, Одеській, Миколаївській, Луганській, Харківській, Тернопільській Івано-Франківській, Львівській, Чернівецькій і Закарпатській областях та АР Крим.</p> |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 1.3.Природоохоронні заходи для захисту ґрунтових вод.

Головне завдання при ліквідації наслідку аварій – ефективна організація природоохоронних заходів з метою мінімізації екологічного збитку.

Порядок ліквідації аварійних розливів регламентується нормативним документом[20]. Приведемо цитату з даного документа, що відноситься до процесу нейтралізації розлитого вантажу: «Для нейтралізації небезпечних речовин на залізничної колії і території застосовують нейтралізатори, зазначені в аварійній картці на даний вантаж і додатку 3 до цих Правил.

Орієнтовні норми витрати нейтралізаторів: сухих речовин – 0,5 – 1 кг/м<sup>2</sup>, водних розчинів – 1 – 2 л/м<sup>2</sup>. Тривалість впливу (експозиція) розчину нейтралізатора становить орієнтовно 0,5 – 2 години. Відалення кулі ґрунту. проводиться на глибину 7-8 см..» (див. стор. 26 [20]). Необхідно відзначити, що ніякій додатковій інформації щодо процесу нейтралізації, його організації залежно від масштабу емісії і тому подібне в документі не приводиться. Очевидно, що така рекомендація не орієнтована на обґрунтування природоохоронних заходів у разі ліквідації масштабних областей забруднення в зоні аерації, а визначає лише нейтралізацію тільки як профілактичну міру для забрудненого ґрунту. Абсолютно відсутні рекомендації, про те, як ліквідовувати зону забруднення в ґрунтових водах, а

такі зони забруднення після аварій – не рідкість і до того ж можуть бути масштабними. У даному документі відсутні які-небудь розрахункові залежності, що дозволяють визначити ефективність заходу, що проводиться, а значить визначити заздалегідь - буде успіх чи ні при проведенні заходу (наприклад, скільки буде нейтралізовано забруднювача в підземному потоці при тому або іншому розміщенні свердловин, що подають нейтралізатор).

Таким чином, можна констатувати, що даний нормативний документ володіє наступними істотними недоліками:

Дає лише загальну рекомендацію щодо тільки одного природоохоронного заходу - процесу нейтралізації ділянки, де відбувся розлив (по суті, визначає тільки вид нейтралізатора).

Абсолютно не дає рекомендацій, науково-обґрунтованій технології як ефективно ліквідовувати великі зони забруднення в зоні аерації, в ґрунтових водах і не приводить методів розрахунку природоохоронних заходів.

У літературі приводиться опис різних технічних заходів, направлених на відновлення якості ґрунтових вод. Ці заходи підрозділяють на дві основні групи: заходи, направлені на видалення забруднених вод із зони, що піддалася техногенному забрудненню і заходи, направлені на поліпшення якості води безпосередньо на місці забруднення.

#### **1.4. Види захисту ґрунтових вод.**

***Зрізання забрудненого ґрунту.*** Гідність даного заходу – наявність необхідних технічних засобів в аварійно-рятувальних бригадах, що дозволяють швидко реалізувати цей захід.

***Недолік*** – великі об'єми забрудненого ґрунту, які необхідно транспортувати для подальшої утилізації. Окрім цього може виникнути проблема «несанкціонованого» поховання зрізаного ґрунту. Так само виникає проблема – де проводити «переробку» зараженого ґрунту. Не виключений витік забруднювача з ґрунту при його транспортуванні.

***Промивка водою, нейтралізатором ділянок після тієї, що зрізає ґрунту.***

Заходи проводяться після тієї, що зрізає ґрунту з метою ліквідації можливих залишкових підзон забруднення [20].

Недолік: можливе надходження нейтралізатора, забрудненої промивної води із зони аерації в підземний потік.

***Дренаж забруднення з підземних вод.*** Гідність: даний захід дозволяє здійснити пряме видалення забруднення з підземного потоку.

Недолік: процес дренажу може бути достатнє довгим і при невеликих концентраціях забруднювача в підземному потоці – не дуже ефективним. Окрім цього, виникає проблема подальшої утилізації, нейтралізації забруднених вод, що відкотили.

***Пристрій стінок, що фільтрують, із завантаженням.*** Захід направлений на очищення забруднених вод безпосередньо в пласті. Недолік: висока вартість.

***Пристрій протифільтраційних стінок з елементами, що фільтрують (перемичками).*** Захід направлений на очищення забруднених вод безпосередньо в пласті. Недолік: висока вартість, достатньо довгий час на відновлення якості підземних вод.

***Застосування підземних захисних стень.*** Гідність: можливість ефективної локалізації зони забруднення в підземному потоці. Недолік: даний метод належить до пасивних методів захисту, тобто при установці стень, подальша зміна їх конфігурації укр. скрутно. Тому, у разі помилкового розташування стень їх ефективність може виявитися низькою.

***Застосування відкритих дренажів.*** Гідність: простота заходу, можливість швидкої технічної реалізації. Недолік: тривалість процесу фільтрації у бік дренажу, необхідність відкачування забруднювача з дренажу з подальшою його утилізацією.

***Застосування нагнітальних свердловин, що подають нейтралізатор у вогнище забруднення (у зоні аерації або в підземному потоці).***

Гідність: достатньо швидка технічна реалізація, можливість ліквідації вогнища забруднення на місці його освіти. Недолік: виникає небезпека надходження у водоносний горизонт «зайвих» порцій нейтралізатора.

***Комбіновані методи.*** Це поєднання, наприклад, застосування підземних захисних стінів і свердловин, що відкачують.

Достоїнства і недоліки цього підходу аналогічні достоїнствам і недолікам, відміченим вище.

Слід зазначити, що вибір того або іншого методу визначається виходячи з конкретних умов, наявності техніки, тимчасових рамок. В даний час найбільш перспективним вважається застосування таких заходів, які дозволяють покращувати якість підземних вод безпосередньо в пласті. Необхідно також відзначити, що застосуванню того або іншого методу захисту повинен передувати розрахунок, що дозволяє визначити ефективність методу з урахуванням конкретних умов.

## РОЗДІЛ 2

### ВІДОМОСТІ ПРО СТАНЦІЮ ПОЛОГИ

Пологи — вузлова дільнична залізнична станція 1-го класу Запорізької дирекції Придніпровської залізниці на перетині ліній Пологи — Комиш-Зоря, Пологи — Верхній Токмак I, Запоріжжя II — Пологи та Чаплине — Пологи. Розташована у місті Пологи Запорізької області між станціями Челюскін (10 км), Гусарка (9 км), Гуляйполе (24 км) та Кирилівка (21 км).

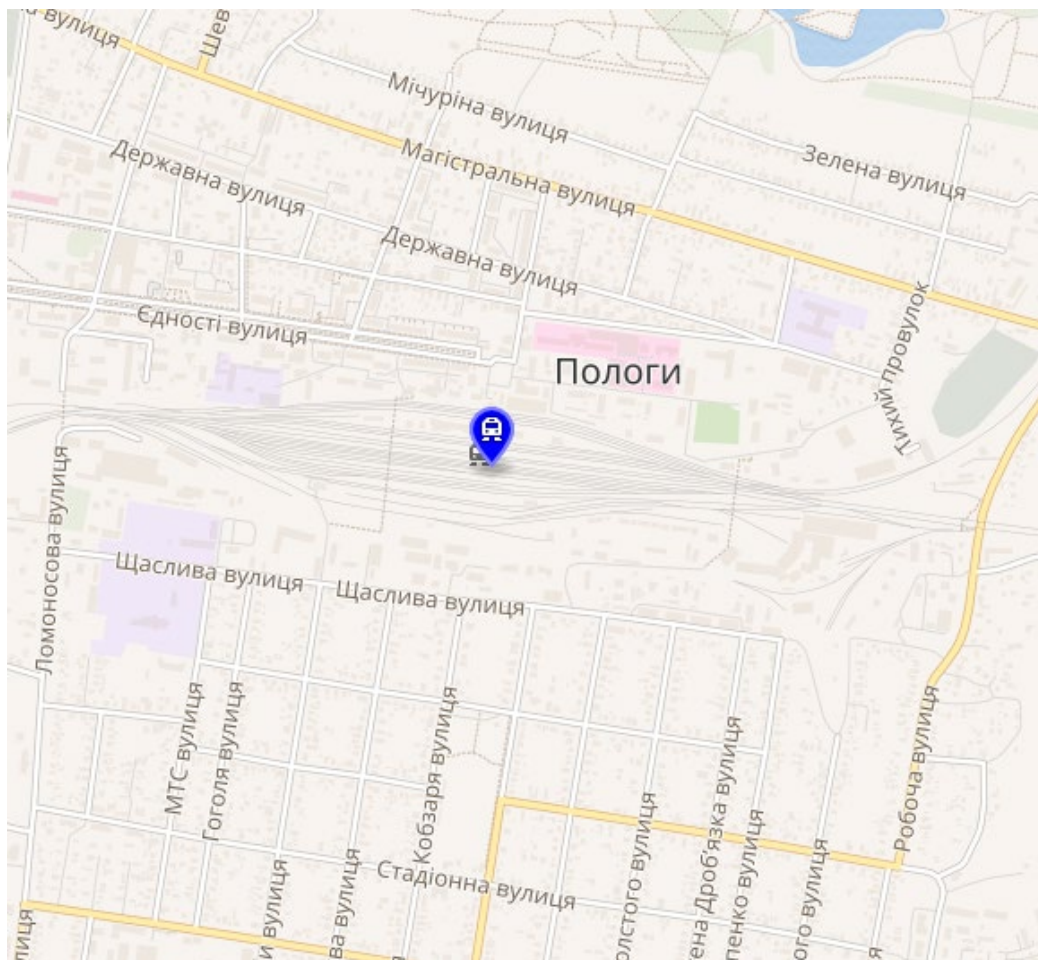


Рисунок 2.1 - Картографічна зйомка станції Пологи

([https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8\\_\(%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8_(%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F)))

На станції Пологи розташовано кілька підрозділів Укрзалізниці:

- локомотивне депо Пологи;
- вагонне депо;
- дистанція сигналізації та зв'язку;
- дистанція колії;
- відновлювальний потяг.

а)



б)



Рисунок 2.2 а),б) Вокзал станції Пологи

([https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8\\_\(%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8_(%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F)))

У 1887 році, у зв'язку з будівництвом залізниці Катеринослав — Бердянськ виникло робітниче селище *Пологи*. Залізнична станція побудована 1894 року.

У 1898 році введена в експлуатацію залізнична гілка Чаплине — Бердянськ<sup>[1]</sup>. З 1904 року, з розвитком залізничного сполучення, селище перетворилося в залізничний вузол.

Населення селища брало участь в революції 1905 року — тут проходили страйки і виступи, у грудні 1905 року був створений страйковий комітет і дружина, але подальша революційна активність була пригнічена після прибуття військ.

29 серпня 1917 року було прийнято «Рішення загальних зборів залізничників і громадян селища Пологи з вимогою взяття влади в руки Рад».

У 2005 році, на честь 100-річчя створення локомотивного депо Пологи на станції встановлено пам'ятник Пологівському паровозу, який був побудований на заводі ЧКД (Чехословаччина) у 1951 році. Такий паровоз серії Е, випускався з 1912 по 1957 рік включно. До війни паровоз випускався на кількох заводах, в тому числі в Швеції, Німеччині. Протягом всього періоду виробництва базовий проект паровоза серії «Е» послідовно поліпшувався, як конструктивних різновидів і підсерій. Внесок паровозів серії «Е» в історію величезний. Вони працювали протягом майже всього ХХ століття і стали учасниками всіх перемог і поразок. А за кількістю локомотивів серії (близько 11 тисяч) і за загальною тривалістю випуску паровоз Е є абсолютним рекордсменом в історії світового паровозобудування і локомотивобудування. Саме паровозам серії «Е» судилося завершити паровозну епоху на залізницях



## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ

#### 3.1. Моделювання геоміграції

Розглянемо виведення рівняння масопереносу. Нехай пористий простір повністю заповнений водою. Виділимо у фільтраційному потоці контрольний об'єм у вигляді паралелепіпеда із сторонами  $dx$   $dy$   $dz$  (рис. 3.1).

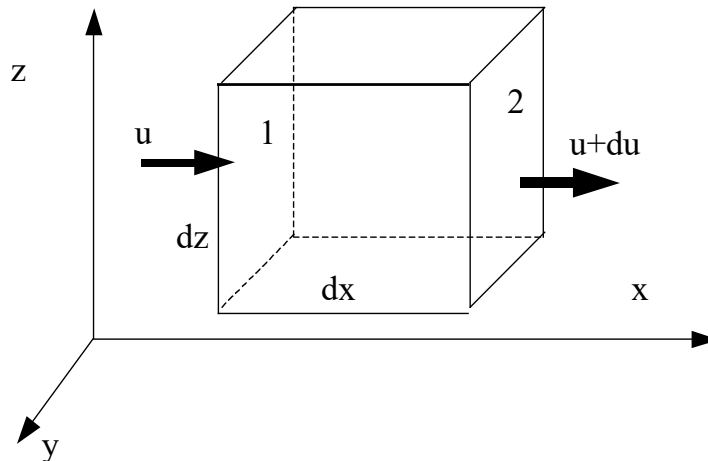


Рисунок 3.1. Контрольний об'єм для виведення рівняння перенесення домішки.

При виведенні рівняння міграції домішки в підземному потоці для застосування моделі сплошності [9] розглядатимемо швидкість фільтрації на гранях контрольного об'єму (рис.3.1.). Хай на межі 1 швидкість фільтрації рідини рівна  $u$  і концентрація домішки в одиниці об'єму рідини –  $\phi$  [кг/м<sup>3</sup>]. Тоді на межі 2, розташовану на відстані  $dx$  від грані 1, ці параметри будуть рівні

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

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

Вважатимемо, що пасивна (що не впливає на гідродинаміку фільтраційної течії) домішка переміщається з рідиною. За час  $dt$  через грань 1 з фільтраційним потоком всередину контрольного об'єму увійде маса домішки  $\varphi u \, dy dz \, dt$ .

За цей же час через грань 2 з контрольного об'єму вийде маса домішки

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

Вважатимемо, що перенесення домішки через грані контрольного об'єму 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 крізь грань 2

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

де  $D_x$  – коефіцієнт дисперсії.

Зміна маси домішки в контрольному об'ємі у напрямі осі  $ox$  складе

$$\left(u\varphi + \frac{\partial u\varphi}{\partial x}dx + q + \frac{\partial q}{\partial x}\right)dydzdt - (u\varphi + q)dydzdt = \\ = \left(\frac{\partial u\varphi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)\right)dx dz dy dt.$$

При виведенні даного виразу були відкинуті доданки другого порядку трохи. Аналогічно, зміна кількості домішки в контрольному об'ємі за рахунок процесів конвекції і дисперсії у напрямі 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 у напрямі осей  $oy$  і  $oz$ . Накопичення домішки в контрольному об'ємі  $dx dy dz$  за час  $dt$  буде рівне

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

де  $n$  – активна пористість.

Це накопичення викликане перебігом домішки через межі контрольного об'єму за час  $dt$ . Рівняння балансу маси домішки для контрольного об'єму матиме вигляд

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

Це рівняння є одним з базових рівнянь при вирішенні завдань перенесення забруднення в підземних водах [6,9].

У рівнянні (3.1) для повнішого опису процесу руху домішки розрізняють коефіцієнти дисперсії по різних напрямках. Проте при практичному його використанні значна трудність 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 вирішення рівняння масопереносу при обробці даних фізичного експерименту, що проводиться з метою визначення поля концентрації забруднювача.

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

Для опису процесу необоротної сорбції використовується залежність вигляду

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

де  $N$  – кількість речовини, поглиненої твердою фазою, в одиниці виділеного об'єму [кг/м<sup>3</sup>];

$u$  – константа швидкості сорбції [1/с];

$c$  – концентрація речовини в рідкому середовищі [кг/м<sup>3</sup>].

Дана залежність описує необмежено велику сорбційну ємкість породи. При моделюванні нерідко процес кінетики сорбції описується рівнянням також

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

де  $c$  – середня концентрація домішки в рідкій фазі;

$c_p$  – концентрація рівноваги.

Точність прогнозів залежить від точності завдання параметрів моделі.

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

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\sigma_p \varphi,$$

де  $\sigma_p$  – константа швидкості розпаду домішки [1/с].

Якщо обмежуватися рівнянням кінетики сорбції (або розпаду) те рівняння масопереносу домішки у фільтраційному потоці прийме вигляд

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

На практиці джерела забруднення вельми різноманітні, проте універсальним способом їх математичного опису буде уявлення їх через дельта-функції Дираку. Це представлення викидів у вигляді системи точкових джерел, які можуть бути такими, що постійно діють (стаціонарними), або джерелами, що діють в перебігу певного часу.

Надалі джерела забруднення інтенсивністю  $Q_i$ , розташовані у фільтраційних потоках, описуватимемо за допомогою дельта-функції Дирак[11]. В цьому випадку рівняння руху забруднювача у фільтраційному потоці прийме вигляд

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

де  $Q_i(t)$  – 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[11].

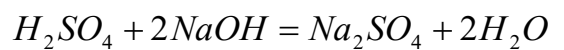
При вирішенні багатьох прикладних завдань має сенс використовувати двовимірну планову модель перенесення домішки у фільтраційному потоці [4,14].

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

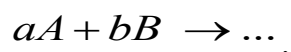
де  $\bar{Q}_i(t)$  – усереднена по глибині потоку інтенсивність точкового викиду.

При виведенні рівняння вважається, що глибина потоку  $h=const$  .[15]

Якщо розглядається процес хімічної взаємодії, то в розробленій прикладній моделі це хімічна взаємодія розраховується на базі інженерного підходу[6,12,18], таким чином. Наприклад, якщо розглядається взаємодія нейтралізатора (луг), що подається в область, де знаходиться кислота, то основою розрахунку є рівняння кінетики, наприклад, таке



Схематично реакцію взаємодії можна записати так [10]:



Рівняння кінетики показує співвідношення: яка кількість (маса) нейтралізатора необхідна для нейтралізації конкретної кількості (маса) забруднювача. Це співвідношення використовується в чисельній моделі при

розрахунку зміни кількості нейтралізатора і забруднювача в кожному контрольному об'ємі при їх хімічній взаємодії.

Процес розрахунку на кожному тимчасовому кроці складається з декількох етапів. На першому етапі здійснюється розрахунок перенесення забруднювача, що потрапив в потік (наприклад кислота), на другому етапі – здійснюється розрахунок руху нейтралізатора. Після виконання цих двох етапів відома концентрація забруднювача і нейтралізатора в кожному контрольному об'ємі (різницевому осередку). На третьому етапі, використовуючи рівняння кінетики, здійснюється розрахунок зміни концентрації, як забруднювача, так і нейтралізатора унаслідок їх взаємодії:

$$\varphi_k^{n+1} = \varphi_k^n - \frac{aM_a}{bM_b} \varphi_k^n,$$
$$\varphi_n^{n+1} = \varphi_n^n - \frac{bM_b}{aM_a} \varphi_n^n,$$

де  $\varphi_k^{n+1}$  – значення концентрації кислоти на новому тимчасовому шарі n+1;

$\varphi_n^{n+1}$  – значення концентрації нейтралізатора на новому тимчасовому шарі n+1;

$M_a$  – молярна маса забруднювача (наприклад, кислота)

$M_b$  – молярна маса нейтралізатора;

a, b – стехіометричні коефіцієнти в рівнянні реакції.

В результаті хімічної взаємодії відбувається зменшення концентрації забруднювача і нейтралізатора в кожному контрольному об'ємі і розрахунок повторюється наново. При вирішенні завдань вважалося, що час реакції достатній швидко, тобто компоненти реагують миттєво. Якщо для реакції необхідне інше співвідношення реагуючих речовин, чим визначено

стехіометричним співвідношенням, то при практичному застосуванні пакету програм, достатньо тільки задати необхідне співвідношення

Розглянемо виведення одновимірного рівняння перенесення домішки. Вважатимемо, що йде процес фільтрації з елементарного об'єму висотою  $dz$ .

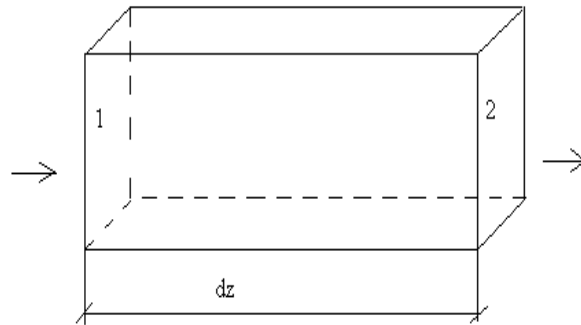


Рисунок 3.2 До виведення рівняння дифузії забруднювача в ґрунті.

За час  $dt$  всередину об'єму за рахунок дифузії крізь грань 1 увійде маса забруднювача:

$$q_1 = -\mu S \frac{\partial C}{\partial z} dt \cdot n,$$

де  $n$  – активна пористість;

$\mu$  – коефіцієнт дифузії.

За цей час з об'єму крізь грань 2 вийде маса:

$$q_2 = q_1 + \frac{\partial q_1}{\partial z} dz = q_1 + \frac{\partial}{\partial z} \left( -\mu S \frac{\partial C}{\partial z} dt \cdot ndz \right).$$

Зміна маси забруднювача у виділеному об'ємі за час  $dt$  складе:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} dt \cdot S \cdot dz.$$



Баланс маси у виділеному об'ємі складе:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} dt \cdot S \cdot dz = q_1 - q_2 ,$$

або

$$n \frac{\partial c}{\partial t} = n \cdot \mu \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} ,$$

де  $\mu$  – коефіцієнт дифузії ( або як прийнято в деяких роботах D);

$z$  – концентрація ;

$z_0$  – координата;

$t$  – час.

Вісь  $z_0$  направлена вертикально вниз, величині  $z_0 = 0$  відповідає положення поверхні землі, а величині  $z_0 = h$  – глибина забруднення ґрунту розливою рідиною. Якщо необхідно врахувати сорбцію і швидкість фільтрації те в дане рівняння має вигляд

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) .$$

## РОЗДІЛ 4

### ПРОЦЕС ВЕРТИКАЛЬНОЇ ПРОМИВКИ ҐРУНТУ НЕЙТРАЛІЗУЮЧИМИ РОЗЧИНАМИ

У комплексі заходів, направлених на захист ґрунту, підземних вод від масштабного забруднення після аварій з рідкими вантажами, входить завдання промивки нейтралізуючими розчинами (НР) «уражених» ділянок ґрунту в зоні аерації. Важливим завданням, вирішення якого може істотно поліпшити результати промивки ґрунту і підвищити ефективність цього процесу, є розробка методу розрахунку даного процесу.

Перш ніж перейти до розгляду застосування розробленої моделі для розрахунку процесу нейтралізації, розглянемо результати експериментальних досліджень.

Для демонстрації промивки ґрунту був проведений фізичний експеримент на кафедрі «Гідравліка і водопостачання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Експериментальна установка була фільтраційним лотком (рис. 4.1) який був заповнений ґрунтом – піском, змішаним з дрібним каменем (коефіцієнт фільтрації ґрунту по воді  $K = 0,14$  см/с). Висота шаруючи завантаження ґрунту – 24 см. Зверху ґрунту на майданчик розміром 745 см швидко виливався 10% розчин  $H_2SO_4$ . Після подачі цього розчину на даний майданчик виливався 20% розчин  $NaOH$ . Процес фільтрації фіксувався за допомогою цифрового фотоапарата CANON, що має таймер.

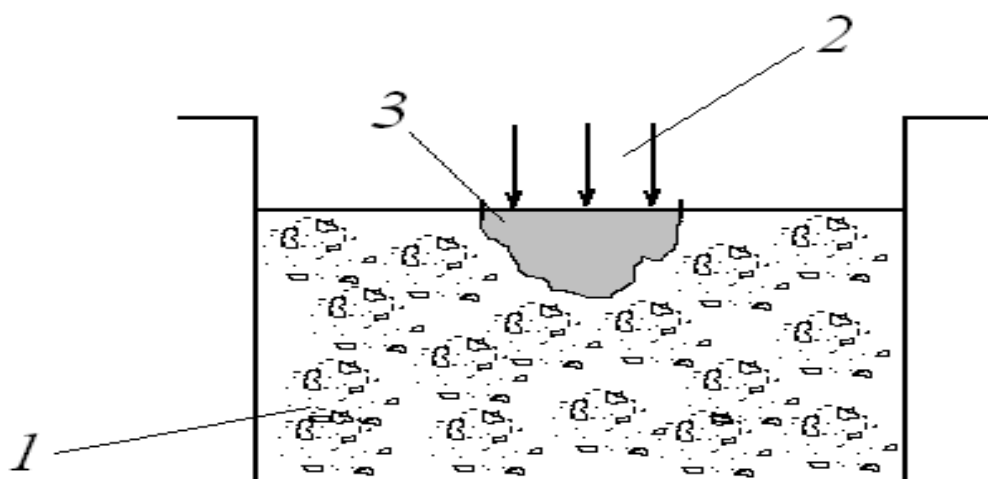


Рисунок 4.1. Схема експериментальної установки:

1 – ємність з ґрунтом;

2 – зона подачі розчину на ґрунт ;

3 – зона промочування.

На Рис. 4.2 представлена фотографія промочування ґрунту після подачі нейтралізатора.

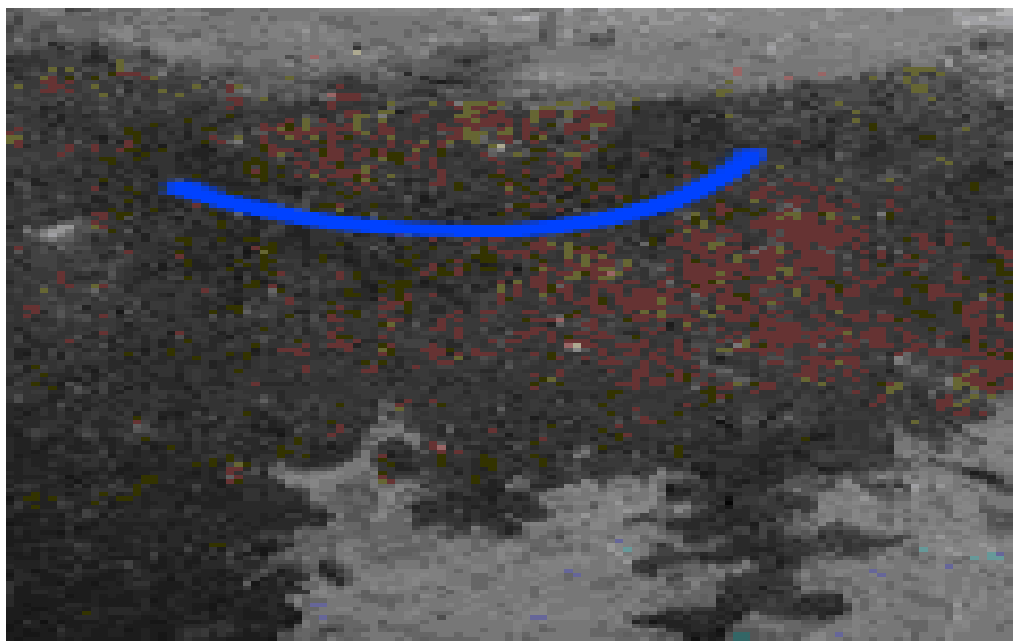


Рисунок 4.2. Зона забруднення ґрунту після подачі нейтралізатора,  $t=2\text{с}$   
(подача  $\text{NaOH}$ ).

На подальших рисунках представлені результати експерименту по моделюванню подачі 20%-ного розчину  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  на ґрунт, куди заздалегідь був поданий 20%-ний розчин  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Спочатку на ґрунт була подана кислота, яка, створила в ґрунті область забруднення. Далі на ґрунт подавався нейтралізатор. З представлених рисунків добре видно виділення газу (продукт реакції) з ґрунту. При проведенні експерименту положення фронту нейтралізатора в ґрунті добре було видне, оскільки на цій межі відбувалося утворення газу. На основі проведеного експерименту можна зробити висновок про те, що швидкість вертикальної фільтрації нейтралізатора була приблизно в 2 рази менше, ніж для варіанту, коли нейтралізатор фільтрувався в незабруднений кислотою ґрунт. Таким чином, для даного випадку, багатофазній фільтрації відбулося збільшення «опору» в ґрунті, створилася «пробка». Отже, на практиці застосування як нейтралізатор розчину  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  може привести до уповільнення процесу фільтрації цього розчину, тобто до уповільнення процесу нейтралізації в ґрунті, що є небажаним.



Рисунок 4.3. Зона забруднення ґрунту  $t = 2с$



Рисунок 4.4. Зона забруднення ґрунту  $t = 8с$

Експеримент проводився на устаткуванні ІГЦ ДГЕ “ Днепрогеофізика”.  
Протокол експерименту додається в додатку.) був проведений натурний експеримент по методу Нестерова Н.С. з метою визначення коефіцієнта фільтрації ґрунту при фільтрації через нього води, 10%-ного розчину  $H_2SO_4$ , а також при фільтрації 10%-ного розчину  $NaOH$  в шурф, куди заздалегідь був поданий 10%-ний розчин  $H_2SO_4$ . Схема установки Нестерова Н.С. представлена на рис.4.5. Опис методики Нестерова Н.С. представлений в роботі[19] .

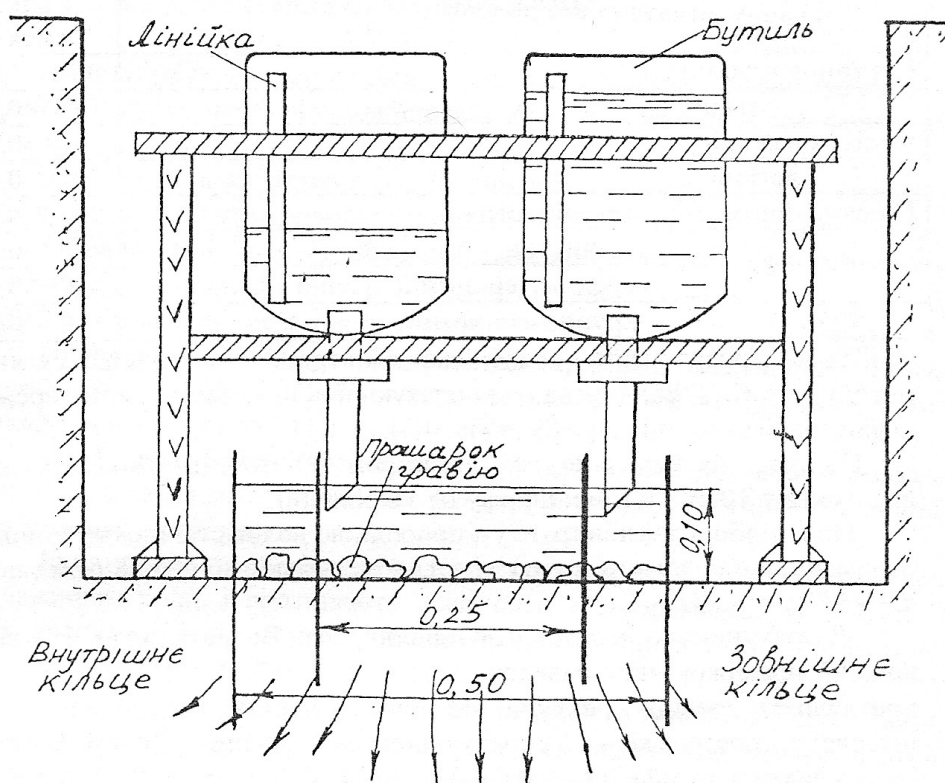


Рисунок 4.5. Схема установки Нестерова Н.С.

Ґрунт мав наступну структуру: поверхнево-рослинний шар закінчувався на відмітці -0,5 м; легкий суглинок закінчувався на відмітці -2,1 м; супісок – на відмітці -4,9 м, далі йшли підземні води. У табл.4.1 представлені досліджені дані по вимірюванню витрати води, що фільтрується через ґрунт по методу Нестерова Н.С.

Таблиця 4.1

Величина витрати води для різних моментів досліду

|                        |    |     |     |     |     |     |     |
|------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| t, хв                  | 60 | 100 | 150 | 270 | 330 | 390 | 410 |
| Q, см <sup>3</sup> /хв | 47 | 41  | 37  | 33  | 31  | 30  | 30  |

У табл.4.2 представлені дані по зміні витрати кислоти, що фільтрується через ґрунт. Видно зменшення величини витрати в порівнянні з варіантом, коли фільтрувалася вода.

Таблиця 4.2

Величина витрати розчину кислоти для різних моментів досліду

|                        |    |     |     |     |     |     |     |
|------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| t, хв                  | 60 | 100 | 150 | 270 | 330 | 390 | 410 |
| Q, см <sup>3</sup> /хв | 44 | 37  | 34  | 28  | 26  | 26  | 26  |

При проведенні третьої проливки спочатку в шурф, по методу Нестерова поступав розчин сірчаної кислоти. Через добу в цей же шурф почав поступати розчин луґу. Зміна величини витрати луґу, що фільтрується, показана в табл.4.3.

Таблиця 4.3

Величина витрати розчину NaOH для різних моментів дослідів (луг фільтрується після розчину кислоти)

|                           |    |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| t, хв                     | 60 | 100 | 150 | 270 | 330 | 390 | 410 |
| Q,<br>см <sup>3</sup> /хв | 41 | 35  | 30  | 20  | 16  | 16  | 16  |

Розрахунок коефіцієнта фільтрації для кожної проливки визначався по формулі:

$$K = \frac{Q}{F} \frac{l}{l + h_1 + h_k},$$

де  $h_1$  – висота в циліндрі (10 см);

$h_k$  – висота капілярного підняття;

$Q$  – величина витрати, що фільтрується, після встановлення;

$F$  – площа фільтрації;

$l$  – глибина промочування.

Так, при подачі води величина коефіцієнта фільтрації, розрахована по даній залежності, склала

$$K_{\text{вода}} = \frac{30}{490} \frac{150}{150 + 10 + 50} = 0.046 \text{ см/хв}$$

Величина коефіцієнта фільтрації при подачі розчину кислоти склала.

$$K_{\text{NaCH}} = 0.038 \text{ см/хв}$$



Величина коефіцієнта фільтрації при подачі розчину луку після подачі розчину сірчаної кислоти склала 0,02 см/хв.

На другому етапі досліджень проводилися експерименти за визначенням ємкості ґрунту при розливі сірчаної кислоти. Дослідження проводилися для 50% розчину кислоти. Експериментальна установка була вертикальним циліндром, який заповнювався досліджуваним ґрунтом.

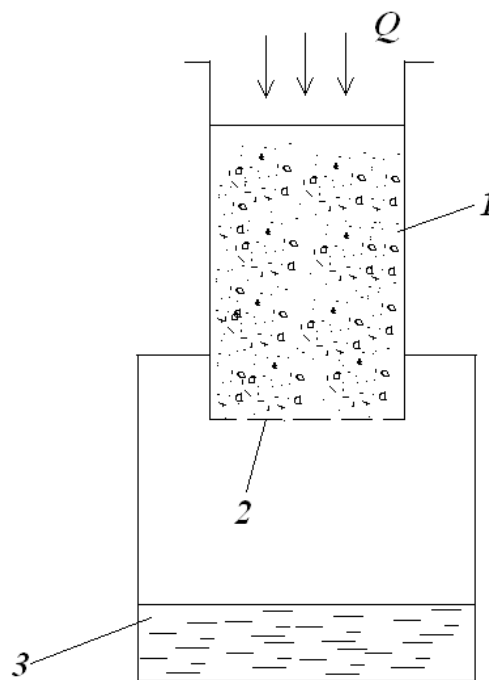


Рисунок 4.6. Схема експериментальної установки

1 – ємність із зразком ґрунту;

2 – сітка;

3 – мірна ємкість.

На дні циліндра знаходилася сітка, а під циліндром розміщувалася мірна ємкість, куди поступала рідина, що профільтрувалася через ґрунт. Зверху досліджуваного ґрунту одноразово виливався певний об'єм кислоти, щоб забезпечити «насичену» фільтрацію. Проведені дослідження показали, що для грубозернистого піску кількість «затриманого» ґрунтом забруднювача

складає близько  $0,5 \text{ см}^3$  на  $1 \text{ см}^3$  ґрунту, для легкого суглинку –  $0,45 \text{ см}^3$ . Для чорнозему (непорушена структура) ця величина складає приблизно  $0,3 \text{ см}^3$  забруднювача, і при цьому спостерігалось «набухання» зразка ґрунту.

Нехай в результаті аварії відбувся розлив забруднювача (соляної кислоти) на ґрунт. З часом під зоною розливу, в зоні аерації, сформувалася зона забруднення. Для моделі, що розглядається нижче, вважатимемо, що відома глибина зони забруднення ґрунту  $h$  і концентрація забруднювача в ній  $\varphi_0$  (рис.4.7).

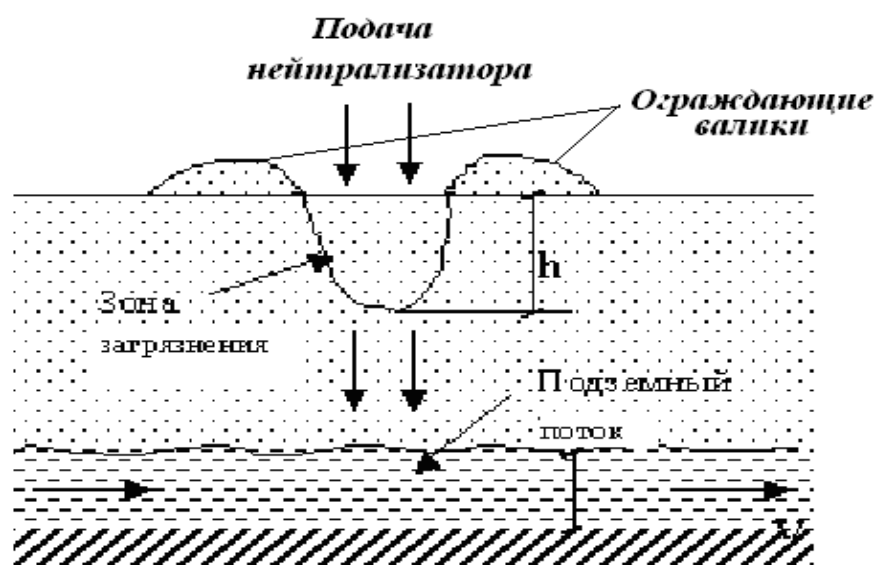


Рисунок 4.7. Схема області забруднення

Для ліквідації зони забруднення під місцем аварійного розливу на ґрунт подається НР. Важливо відзначити, що для ефективної промивки питома витрата  $q$  НР на одиницю площі ґрунту обов'язково повинна бути більше коефіцієнта фільтрації ґрунту  $\delta_0$ , тобто  $q > k$ . При такому режимі промивки на поверхні землі буде створений рівень НР (в зв'язку з цим обваловка зони розливу - обов'язкова) і відбуватиметься процес руху НР за типом фільтрації в насичений ґрунт. При побудові математичної моделі вважатимемо, що

відома структура ґрунту, глибина розташування дзеркала підземних вод, тип НР, його концентрація.

Математична модель. Процес руху НР усередині ґрунту описуватимемо наступним рівнянням масо переносу:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right),$$

де  $n$  - активна пористість;

$Z$  – концентрація нейтралізатора;

$u$  - швидкість фільтрації;

$\sigma$  – коефіцієнт, що враховує процеси хімічного розкладання забруднення, сорбції;

$D$  -коефіцієнт дисперсії .

Для даного рівняння ставляться наступні граничні умови: на вході в розрахункову область задається концентрація нейтралізатора, на виході з розрахункової області ставиться м'яка гранична умова  $\frac{\partial C}{\partial X} = 0$  . Як початкова

умова вважається, що в початковий момент часу концентрація нейтралізатора в ґрунті рівна нулю і відома концентрація забруднюючої речовини в ґрунті.

Рівняння (4.1) доповнюється моделлю кінетики процесу взаємодії забруднювача в ґрунті і нейтралізуючої речовини в НР. Наприклад, у разі нейтралізації соляної кислоти і подачі розчину NaOH маємо:



У розробленому пакеті програм, що реалізовує на ПЕВМ розрахунок по розробленій моделі, процес кінетики взаємодії розраховується в окремій підпрограмі, що дозволяє швидко набудувати пакет на рішення будь-якої задачі з даного класу.

**Метод рішення.** Для чисельної інтеграції рівняння (4.1) моделі застосовується поперемінно-трикутна неявна різницева схема розщеплювання. Розщеплювання рівняння (4.1) в різницевому вигляді виконується так, щоб на кожному дробовому кроці невідоме значення концентрації нейтралізатора визначалося б по явній формулі рахунку, що біжить.

**Алгоритм рішення задачі.** Порядок розрахунку процесу промивки «ураженої» ділянки ґрунту НР на базі моделі (4.1) полягає в наступному:

Задаються гідрогеологіческие параметри ґрунту, де здійснюється обробка, ступінь його забруднення, глибина зони забруднення;

Здійснюється розрахунок рівняння масопереносу і процесу взаємодії забруднювача з нейтралізуючою речовиною.

На друк виводяться результати розрахунку значення концентрації забруднювача в ґрунті після подачі НР і значення концентрації нейтралізатора в розчині, що фільтрується через ґрунт.

**Практична реалізація.** Пакет програм, створений на базі побудованого методу розрахунку, був використаний для вирішення наступного завдання. Відбувся розлив соляної кислоти, в результаті якого відбулося забруднення всієї зони аерації завглибшки 4,64 м, площа зони розливу  $100\text{ м}^2$ . У зоні аерації знаходиться приблизно 14100 кг кислоти. Структура ґрунту: поверхнево-рослинний шар (ПРС) – 0,5 м, суглинок – 1.8 м, супісок – 2,24 м, далее- ґрунтові води. Концентрація кислоти в ґрунті складає  $\varphi_{0=30} \text{ кг/м}^3$ . Для реабілітації «ураженої» ділянки ґрунту застосовується подача 10%-ного розчину NaOH. Гідрогеологічні параметри:  $n=0,2$ ;  $y=0$ ;  $K_{ж}=0,34 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ ,  $D=0,001 \cdot \text{и}$ . При вертикальній фільтрації швидкість фільтрації, з часом стає рівній величині коефіцієнта фільтрації. Тому вважатимемо, що швидкість вертикальної фільтрації дорівнює заданому коефіцієнту фільтрації. подача

нейтралізатора здійснюється так, щоб над поверхнею землі був шар нейтралізуючого розчину. На практиці достатньо, щоб величина цього шару складала приблизно 5-10 см.

Результати обчислювального експерименту по моделюванню промивки ґрунту в цілях нейтралізації в ній кислоти представлені в табл. 4.4, 4.5. У табл. 4.1. показана, для різних моментів часу, величина (глибина) ділянки ґрунту де відбулася нейтралізація, а також кількість нейтралізованої кислоти в ґрунті.

Таблиця 4.4

Глибина зони нейтралізації і кількість нейтралізованої кислоти

| t, хв | Глибина<br>нейтралізованої ділянки,<br>м | Маса нейтралізованої<br>кислоти в ґрунті, кг |
|-------|------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 226   | 0,16                                     | 700                                          |
| 493   | 0,40                                     | 1400                                         |
| 1320  | 1,04                                     | 3300                                         |
| 5826  | 4,48                                     | 13800                                        |

Відзначимо, що моменту часу  $t=0$  відповідає початок подачі нейтралізатора на уражену ділянку. Як видно з даної таблиці до моменту часу  $t=5826$  хв буде нейтралізовано практично основна частина кислоти в зоні аерації. Нейтралізатор, проходячи зону аерації, може потрапити в підземний потік. На основі розробленої чисельної моделі є можливість прогнозувати інтенсивність забруднення підземного потоку за рахунок фільтрації нейтралізатора. У табл. 4.4. показано, яка кількість нейтралізатора поступатиме в підземний водоносний горизонт, якщо вчасно не зупинити процес нейтралізації.

Таблиця 4.5

Кількість NaOH, що поступив в підземний водоносний горизонт на 1 м<sup>2</sup> оброблюваної зони розливу

|               |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|
| t,хв          | 5906 | 5960 | 6013 | 6053 |
| Маса NaOH, кг | 0,29 | 1,85 | 4,44 | 6,88 |

Як видно з табл.4.5. з часом відбувається наростання ступеня забруднення підземного водоносного горизонту під оброблюваною ділянкою за рахунок інфільтрації нейтралізатора. Для даної зони забруднення, яка обробляється, загальна кількість нейтралізатора, що потрапив в підземний потік до моменту часу  $t=6053$  хв складе близько 688 кг. За допомогою розробленої чисельної моделі можна оптимізувати процес нейтралізації так, щоб зменшити кількість нейтралізатора, що потрапляє в підземний потік. Оскільки при розрахунку визначається на даний момент часу, яке кількості кислоти вже нейтралізовано (а значить відомо, яка кількість кислоти ще не нейтралізована), а також яка кількість нейтралізатора ще не встигла вступити в реакцію в зоні аерації. На підставі цих даних в розробленій програмі визначається момент часу, коли в розчині, що поступає на ґрунт, вже може не бути нейтралізатора. Наприклад, для розглянутої вище ситуації, до моменту часу  $t=1520$  хв зміст лугу може бути рівне 0. В цьому випадку процес нейтралізації характеризується такими даними (див. табл. 4.6, 4.7).

Таблиця 4.6

Кількість нейтралізованої кислоти при оптимізації процесу нейтралізації

|                                           |       |       |       |       |
|-------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| t, хв                                     | 6206  | 6460  | 6966  | 7220  |
| Маса нейтралізованої кислоти в ґрунті, кг | 13200 | 13400 | 13900 | 14000 |

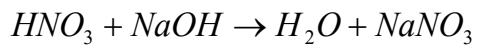
Таблиця 4.7

Кількість NaOH, що поступив в підземний водоносний горизонт на 1 м<sup>2</sup> оброблюваної зони розливу при оптимізації процесу нейтралізації

|               |       |      |      |
|---------------|-------|------|------|
| t,хв          | 7346  | 7473 | 8233 |
| Маса NaOH, кг | 0,011 | 0,13 | 0,44 |

З даних, приведених в табл. 4.6, 4.7 можна зробити наступний вивід. По-перше, при оптимізації процесу нейтралізації шляхом припинення подачі нейтралізатора в потік, що фільтрується, в певний момент часу відбувається уповільнення темпу процесу нейтралізації кислоти в ґрунті. По-друге, процес оптимізації дозволяє істотно зменшити кількість нейтралізатора, що поступає в підземний потік при процесі обробки. З табл. 4.6 видно, що до моменту часу  $t=8233$  хв в підземний потік поступить всього 44 кг лугу для оброблюваної площі, що в 15 разів менше, ніж в розглянутому вище варіанті, коли не було процесу оптимізації. Відзначимо, що при рішенні даної задачі, в розрахунок вкладався 5% «запас» нейтралізатора в що фільтрується розчині в порівнянні з тим, що потрібний, виходячи із стехіометричного співвідношення.

Нижче представлені результати розрахунку процесу нейтралізації азотної кислоти в зоні аерації. Процес нейтралізації описувався наступним рівнянням:



Розрахунок виконаний при наступних початкових даних. Забруднення зони аерації відбулося на повну її мощность- 4,56 м, площа зони розливу 300м<sup>2</sup>. У зоні аерації знаходиться приблизно 57 т кислоти. Структура ґрунту: ПРС – 0,5 м, суглинок – 2.1 м, супісок – 1,96 м. Концентрація кислоти в ґрунті складає  $\rho_0=42$  кг/м<sup>3</sup>. Для реабілітації «ураженої» ділянки ґрунту застосовується подача 10%-ного розчину NaOH. Гидрогеологічні параметри:  $n=0,2$ ;  $K_{ж}=0,22 \cdot 10^{-5}$  м/с,  $D=0,001$  м.

У табл.4.8 представлені результати розрахунку динаміки процесу нейтралізації кислоти в зоні аерації.

Таблица 4.8

Глибина зони нейтралізації і кількість нейтралізованої кислоти

| t, хв | Глибина нейтралізованої ділянки, м | Маса нейтралізованої кислоти в ґрунті, кг |
|-------|------------------------------------|-------------------------------------------|
| 2700  | 1,45                               | 19200                                     |
| 5400  | 2,83                               | 37500                                     |
| 9000  | 4,56                               | 57000                                     |

Як видно з даної таблиці зменшення коефіцієнта фільтрації в порівнянні з попереднім варіантом привело до зниження темпу нейтралізації кислоти в зоні аерації.



На закінчення відзначимо, що запропонований метод у багатьох випадках дозволяє замінити фізичний експеримент, що вимагає досить багато часу на постановку, проведення і обробку результатів. Розроблений метод є достатньо універсальним, заснований на фізичному законі збереження маси, легко реалізується на ПЕВМ. Застосування методу на практиці дозволяє оптимізувати процес промивки, вибрати оптимальну кількість нейтралізуючої речовини, режим промивки з урахуванням мінімізації можливого збитку, що наноситься навколишньому середовищу.

Слід зазначити, що аварійні розливи на залізничному транспорті приводять до значного економічного збитку. Наприклад, розглянемо розрахунок величини збитку при розливі на поверхню ґрунту 60 т сірчаної кислоти.

Розрахунок розмірів компенсації збитку виконується згідно «Методиці розрахунку розмірів відшкодування збитків заподіяних державі унаслідок порушення законодавства про охорону і раціональне використання водних ресурсів», затвердженою наказом Міністерства екології і природних ресурсів України 18.05.1995г. № 37 і зареєстрованої в Міністерстві юстиції України 01.06.1995г. № 1623\698.

Згідно п. 7.2.7. «Методик...» об'єм (V) забрудненої частини визначається по формулі (14) «Методики .»:

$$V_n = F \cdot m \cdot n_a$$

де  $F$  – площа забруднення, кв. м;

$$F = 2812500$$

$m$  – середня потужність забрудненої частини водоносного горизонту, м;

$$m = 10;$$

$n_a$  – активна пористість, долі одиниць (таблиця № 1 «Методики...»)

$$n_a = 0,05.$$

Тоді, згідно приведеної формулі маємо

$$V_n = 2812500 \cdot 10 \cdot 0,05;$$

$$V_n = 1406250$$

Розмір збитку розраховується по формулі:

$$З_{пв} = V_n \cdot n \cdot V_z \cdot б$$

де  $n$  - розмір неоподаткованого мінімуму доходів;

$$n=17;$$

$V_z$  - питома величина екологічного збитку (таблиця №2 Методики);

$$V_z = 0,0051;$$

$б$ и – коефіцієнт, який враховує природну захищеність підземних вод і ґрунтів;

$$б=1,3;$$

$$З_{пв} = 1406250 \cdot 17 \cdot 0,0051 \cdot 1,3$$

$$З_{пв} = 158498,4 \text{ грн.}$$

Отже, встановлений розмір збитку унаслідок розливу на поверхню ґрунту 60 т сірчаної кислоти складає 158498,4 грн.

Необхідно відзначити, що 60 т – це грузнув, що перевозиться в одній цистерні. Абсолютно очевидно, що при аваріях на залізничному транспорті, коли відбувається схід 9 і більш за цистерни величина збитку буде значно більше. Слід також мати на увазі і соціальний збиток, оскільки при аваріях забруднюються ґрунтові води, які часто використовуються в сільськогосподарському водопостачанні і їх забруднення викликає різко негативну реакцію у населення. Важливо відзначити, що згідно законодавству винуватець забруднення зобов'язаний не тільки сплатити збиток, але і ліквідувати забруднення.

Сформулюємо наступні рекомендації по організації процесу промивки ґрунту:

1. Перед початком розробки заходів щодо захисту ґрунту від забруднення після аварійних розливів необхідне отримання гідрогеологічної інформації щодо місця розливу: про структуру ґрунту (товщина шарів,

коефіцієнт фільтрації), глибину залягання підземних вод, потужність підземного водоносного горизонту (при крупних аваріях).

2. Необхідно провести визначення величини концентрації забруднюючої речовини під зоною розливу  $\varphi_0$  і глибини забруднення ґрунту.

3. Якщо як захист ґрунту і підземних вод від забруднення вибраний метод подачі на поверхню ґрунту нейтралізатора, то слід подавати на ґрунт нейтралізатор з питомою витратою на одиницю площі  $q > k$ , де  $\alpha_0$  - коефіцієнт фільтрації ґрунту, тобто вибір витрати нейтралізатора визначається в першу чергу типом ґрунту. В цьому випадку матиме місце «насичена» фільтрація нейтралізатора. Інакше, т.е. при  $q < k$  - відбуватиметься фільтрація в «ненасичений» ґрунт, що є малоефективним методом для ліквідації зони забруднення в ґрунті.

## **ВИСНОВКИ**

1. Виконаний аналіз ступеня захищеності ґрунтових вод України.
2. Розроблена математична модель нейтралізованої кислоти в ґрунті шляхом інфільтрацією нейтралізуючого розчину, який подається на поверхню ґрунту.
3. На основі розробленої моделі проведені обчислювальні експерименти по оцінці ефективності процесу нейтралізації сірчаної кислоти в ґрунті.
4. У натурних умовах, по методу Нестерова Н.С. проведений експеримент з метою визначення коефіцієнта фільтрації при русі розчину луку через зону, заповнену кислотою.
5. У лабораторних умовах проведений експеримент по візуалізації процесу нейтралізації сірчаної кислоти в зоні аерації.
6. Виконаний економічний розрахунок збитку при аварійному розливі.
7. Розглянуті питання охорони праці при роботі з нейтралізуючими кислотними реагентами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: учебное пособие; под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – М.: Издательство АСВ, 2001. - (в 5 кн.)
2. Алексеев В. С. Проектное обоснование восстановления водоносных горизонтов, загрязненных нефтепродуктами / Алексеев В. С., Куранов Н. П., Куранов П. Н. / Водоснабжение и санитарная техника. – 1999.– с. 42 – 43.; №4.
3. Вопросы автоматизированного решения задач фильтрации на ЭВМ / Ляшко И. И., Сергиенко И. В., Мистецкий Г. Е., Скопецкий В. В.– К.: Наукова думка, 1977.–288 с.
4. Беляев Н. Н. Гидродинамический метод защиты подземных вод от загрязнения / Беляев Н. Н., Калашников И. В. Материалы 7-й науч.-практ. конф. «Вода: проблемы и решения» - Д.: Гамалія, 2004. – с. 46.
5. Бертокс П. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений / Бертокс П. Радд Д. М.: Мир, 1980.- 606 С.
6. Бочеввер Ф. М. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений / Бочеввер Ф. М., Орадовская А. Е.–М.: Недра, 1972.–129 с.
7. Бочеввер Ф. М. Защита подземных вод от загрязнения / Бочеввер Ф. М., Лапшин Н. Н., Орадовская А. Е. – М.: Недра, 1979. – 256 с.
8. Владимиров А. М. Охрана окружающей среды / Владимиров А. М. Ляхин Ю. И., Матвеев Л. Т., Орлов В. Г. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 423 с.
9. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ / Под ред. Р.С. Штенгелова – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 335 с.
10. Глущенко А. А. Деякі неізотермічні задачі теорії масопереносу в ґрунтових водах / Глущенко А. А., Гординська Т. Л. Вісн. Укр. держ. акад. водного господарства.– 1998. Вип. 27. – с.48–51.
11. Голубев В. С. Гетерогенные процессы геохимической миграции / Голубев В. С., Гарибянц А. А. – М.: Недра, 1968. – 190 с.

12. Гольдберг В. М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / Гольдберг В. М., Газда С. – М.: Недра, 1984,–262 с.
13. Гольдберг В. М. Методические рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1980.– 68 с.
14. Гольдберг В. М. Проницаемость и фильтрация в глинах / Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. – М.: Недра 1986.–172с.
15. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. – К: Наукова думка.–1997.–368 с.
16. Зеленько Ю. В. Кинетика миграции дизельного топлива через грунты во время технологических проливов и транспортных аварий / Зеленько Ю. В., Плахотник В. И. Вісн. Дніпропетр. нац. ун. Д., 2004. Вип. 3, с. 30–33
17. Константинов Ю. Н. Гидравлика. К.: Вища школа, 1981. –360 с.
18. Крайнов С. Р. Геохимические модели прогноза формирования качества подземных вод (обзор возможностей и ограничений). Водные ресурсы. – 1999, Т.26, №3. – с.322–334.
19. Лапшова В. М. Методические рекомендации по организации и ведению мониторинга подземных вод / Лапшова В. М., Гольдберг, С. Г. Мелькановицкая – М.: ВСЕГИНГЕО, 1985.–82 с.
20. Мироненко В. А. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований) / Мироненко В. А., Румынин В. Г., Учаев В. К.– Л.: Недра, 1980. – 320 с.