

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОЗАЧИНА ВАЛЕРІЯ ВЯЧЕСЛАВІВНА

УДК 626.86

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМ ЗАХИСТУ
ТЕРИТОРІЙ ВІД ПІДТОПЛЕННЯ

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ В. В. Козачина

Науковий керівник: Біляєв Микола Миколайович, д.т.н., проф.

Дніпро – 2026 р.

АНОТАЦІЯ

Козачина В. В. Удосконалення методів розрахунку систем захисту територій від підтоплення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. – Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2026.

Дисертацію присвячено розробці високоефективних чисельних моделей, що дають можливість швидко досліджувати ефективність роботи дренажної системи або окремих елементів цієї системи на етапі її проектування.

У **першому розділі** дисертації проведено аналіз наукових публікацій, присвячених підтоплення територій. Даний аналіз показує світову тенденцію щодо збільшення кількості територій, що потрапляють в зону підтоплення. Тому виникає комплекс важливих задач по організації засобів захисту територій від підтоплення для різних гідрологічних умов. Проведено аналіз причин, що призводять до підтоплення територій. Проведено аналітичний огляд літературних джерел, який показав, що існують різні методи зниження рівня підземних вод на підтоплених територіях, одним з найбільш ефективних є дренаж. На етапі проектування вибір того чи іншого методу дренажу визначається шляхом попереднього оцінювання ефективності майбутньої системи дренажу методом математичного моделювання. Виконано аналіз сучасних методів прогнозування динаміки підземних вод, який показав, що використання фізичного експерименту для рішення задач, що виникають при проектуванні систем дренажу, має чимало обмежень. Це пов'язано зі значними витратами часу на постановку експерименту та високими фінансовими витратами. Фізичний експеримент, в значній мірі, спрямований на визначення різних гідрологічних параметрів, що далі використовуються в теоретичних розрахунках при проектуванні систем дренажу. На основі вивчення літературних даних виявлено, що сучасним напрямом дослідження динаміки підземних вод, процесів геоміграції є використання чисельних моделей. Але наразі існує певний дефіцит прикладних чисельних моделей, що дозволяють комплексно вирішувати задачі

динаміки підземних вод та тепломасопереносу при проектуванні систем дренажу. Використання комерційних програмних комплексів (наприклад, пакету «MODFLOW») потребує високої кваліфікації користувача та значних економічних витрат через їх високу вартість; крім цього, потрібна детальна вхідна інформація для проведення обчислювального експерименту, що не є завжди доступною, особливо на початку проектних робіт, та отримання якої потребує часу та значних коштів. Аналіз літературних джерел по даній проблематиці виявив необхідність у створенні надійних та економічних методів чисельного дослідження динаміки підземних вод та процесів тепломасопереносу в них.

У **другому розділі** дисертації розглянуто побудову математичних моделей для розв'язання складних, багатофакторних задач по оцінці ефективності використання систем для зниження рівня ґрунтових вод на підтоплених територіях. Запропоновано математичні моделі для комплексного розв'язання задачі «дренаж підземних вод + робота проникного бар'єру». Запропоновано математичні моделі для комплексного розв'язання задачі «динаміка підземних вод + робота устаткування по заморожуванню підземного потоку». Даний клас задач є підготовчим етапом перед використанням дренажу підземних вод на окремій ділянці. Розглянуті математичні моделі базуються на фундаментальних законах механіки суцільного середовища – законі збереження маси та законі збереження енергії. Розглянуті математичні моделі допускають лише чисельне розв'язання. Тому необхідним є розробка ефективних чисельних моделей для практичної реалізації багатофакторних моделей динаміки підземних вод та тепломасопереносу. Для аналізу динаміки підземних вод при роботі дренажу запропоновано використання двох моделей гідродинаміки в залежності від наявності початкових даних. При недостатній кількості надійних початкових даних запропоновано використовувати модель потенціального руху. При достатній кількості початкових даних пропонується використовувати планову модель фільтрації ґрунтових вод. Запропоновані математичні моделі відносяться до класу «operational models», тобто моделей, що дозволяють проводити наукове

дослідження багатфакторних процесів динаміки ґрунтових вод та тепломасопереносу з метою обґрунтування інженерних рішень, що приймаються.

В **третьому розділі** дисертації розглянуто побудову чисельних моделей для розв'язання задачі гідродинаміки ґрунтових вод при роботі дренажної системи. Розглянуто побудову чисельних моделей тепломасопереносу для рішення задач геоміграції. Для чисельного розв'язання моделюючих рівнянь застосовано явні різницеві схеми. Це дає змогу здійснити просту програмну реалізацію різницевих моделюючих рівнянь. Виконано програмну реалізацію розроблених чисельних моделей. Створені коди являють собою інструмент розв'язання складних багатфакторних задач з оцінки ефективності роботи дренажних систем та їх елементів. В розділі наведено результати верифікації розроблених моделей, які підтверджують їхню адекватність. Побудовані чисельні моделі дають змогу замінити складні лабораторні та натурні експерименти, скоротити час на отримання науково обґрунтованих даних щодо ефективності застосування дренажних систем.

В **четвертому розділі** дисертації розглянуто практичне використання побудованих чисельних моделей на прикладі розв'язання комплексу задач, що виникають при розробці проєктів дренажу для підтоплених територіях. Представлені в розділі результати дають змогу зробити висновок, що розроблені чисельні моделі фільтрації, геоміграції, теплосопереносу дають змогу враховувати низку важливих фізичних факторів, що впливають на процес динаміки підземних вод, при цьому для їх застосування потрібна стандартна геологічна інформація.

Ключові слова: дренаж, підземні води, динаміка підземних вод, рівняння фільтрації, забруднення підземних вод, забруднюючі речовини, гідрогеологія, гідрогеологічні умови, свердловина, математичні моделі, чисельні моделі, захисні споруди, тепломасоперенос.

ABSTRACT

Kozachyna V. V. Improvement of methods for calculating protection systems against territory flooding – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 192 – Building Industry and Civil Engineering. – Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2026.

The dissertation is dedicated to the development of highly efficient numerical models that enable to carry out quick investigation of the effectiveness of a drainage system or its elements at the design stage.

The first chapter of the dissertation analyses scientific publications dedicated to flooding. This analysis shows a global trend toward an increase in the number of areas affected by flooding. This raises a number of important issues regarding the organization of flood protection measures for different hydrological conditions. An analysis of the causes of flooding is conducted. An analytical review of the literature shows that there are various methods for lowering the groundwater level in flooded areas, one of the most effective among them is drainage. At the design stage, the choice of a particular drainage method is determined by a preliminary assessment of the effectiveness of the future drainage system using mathematical modeling. An analysis of modern methods for predicting groundwater dynamics was performed, which showed that the use of physical experiments to solve problems arising in the design of drainage systems has many limitations. This is due to the significant time required to set up the experiment and the high financial costs. Physical experiments are largely aimed at determining various hydrological parameters, which are then used in theoretical calculations when designing drainage systems. Based on a review of the literature, it has been found that the current trend in research on groundwater dynamics and geomigration processes is the use of numerical models. However, there is currently a shortage of applied numerical models that allow for a comprehensive solution to the problems of groundwater dynamics and heat and mass transfer in the design of drainage systems. The use of commercial software packages (e.g., MODFLOW) requires a high

level of user qualification and significant economic costs due to their high price. In addition, detailed input information (which obtaining requires time and significant funds) is needed to conduct a computational experiment, that is not always available, especially at the beginning of design work. Based on a study of the literature, there is a need to develop effective and economical methods for numerical study of groundwater dynamics and heat and mass transfer processes in them.

The second chapter of the dissertation considers the development of mathematical models for solving complex, multifactorial problems of evaluating the effectiveness of systems for lowering the groundwater level in flooded areas. Mathematical models are proposed for the comprehensive solution of the problem of «groundwater drainage + permeable barrier operation». Mathematical models are proposed for the comprehensive solution of the problem of «groundwater dynamics + operation of equipment for freezing underground flow». This class of problems is a preparatory stage before using groundwater drainage in a specific area. The mathematical models considered are based on the fundamental laws of continuum mechanics – the law of conservation of mass and the law of conservation of energy. The mathematical models considered allow only numerical solutions. Therefore, it is necessary to develop effective numerical models for the practical implementation of multifactorial models of groundwater dynamics and heat and mass transfer. To analyze groundwater dynamics during drainage operation, it is proposed to use two hydrodynamic models depending on the availability of initial data. If there is insufficient reliable initial data, using a potential flow model is suggested. If there is sufficient initial data, it is proposed to use a planned groundwater filtration model. The proposed mathematical models belong to the class of «operational models», i.e. models that allow scientific research of multifactorial processes of groundwater dynamics and heat and mass transfer to be carried out in order to justify the engineering decisions that are made.

The third chapter of the dissertation considers the development of numerical models for solving the problem of groundwater hydrodynamics during the operation of a drainage system. The development of numerical models of heat and mass transfer for

solving geomigration problems is considered. Explicit difference schemes are used for numerical integration of modeling equations. This allows for simple software implementation of difference modeling equations. The developed numerical models have been implemented in software. The codes created are a tool for solving complex multifactorial problems of assessing the efficiency of drainage systems and their elements. The section presents the results of verification of the developed models, which confirm their adequacy. The developed numerical models make it possible to replace complex laboratory and field experiments and reduce the time required to obtain scientifically sound data on the effectiveness of drainage systems.

The fourth section of the dissertation considers the practical use of the developed numerical models using the example of solving a set of problems that arise when developing drainage projects for flooded areas. The results presented in the chapter allow to conclude that the developed numerical models of filtration, geomigration, and heat transfer make it possible to take into account a number of important physical factors that influence the dynamics of groundwater, while their application requires standard geological information.

Keywords: drainage, groundwater, groundwater dynamics, filtration equations, groundwater pollution, harmful substances, hydrogeology, hydrogeological conditions, well, mathematical model, numerical models, protective structures, heat and mass transfer.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових наукових виданнях України:

1. Біляєв М. М., Козачина В. В. Моделювання гідродинаміки ґрунтових вод на підтоплених територіях. Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 2 (014). С. 36–41. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.36.928. (**особистий внесок:** розробка чисельних моделей, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка даних обчислювального експерименту).
2. Біляєв М. М., Козачина В. В. Моделювання нестационарного процесу масопереносу в підземних водах. Наука та прогрес транспорту. 2024. № 2 (106). С. 18–25. <https://doi.org/10.15802/stp2024/305701>. (**особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки та масопереносу, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка даних обчислювального експерименту).
3. Біляєв М. М., Козачина В. В. Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах. Наука та прогрес транспорту. 2024. Вип. 3(107). С. 5–14. <https://doi.org/10.15802/stp2024/313664>. (**особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки, теплопереносу, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка даних обчислювального експерименту).
4. Біляєв М. М., Козачина В. В., Гунько О. Ю., Кузнецов В. М., Звонарьова О. В. (2025). Математичне моделювання процесу нейтралізації агресивної домішки у підземних водах: експрес модель. Наука та прогрес транспорту. 2025. Вип. 4(112). С. 27–33. <https://doi.org/10.15802/stp2025/346941> (**особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод, нейтралізації домішки, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювальних експериментів).

5. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Kirichenko P. S., **Kozachyna V. V.**, Kaidash M. D. Numerical Modeling of Groundwater Dynamics and Heat and Mass Transfer Processes. Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture. 2024. No. 6 (024). P. 135–143. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.271224.135.1121>.

(особистий внесок: розробка чисельних моделей гідродинаміки, тепломасопереносу, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка даних обчислювального експерименту).

6. Biliaiev M. M., **Kozachyna V. V.** Modeling Ground Waters Dynamics and Pollution. Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture. 2024. No. 2 (020). P. 137–143. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.137.1052>.

(особистий внесок: розробка чисельних моделей, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка даних обчислювального експерименту).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Біляєв М. М., Коваленко А. С., **Козачина В. В.**, Скуратов М. О., Чірков А. О. Математичне моделювання динаміки водних потоків. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 12-13 грудня 2024 р.). Д.: УДУНТ, 2024. С. 112. **(особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод, тепломасопереносу, створення комп'ютерного коду).

8. Біляєв М. М., Козачина В. А., **Козачина В. В.** Чисельне моделювання процесів гідродинаміки. XIV International scientific and practical conference «Solving Scientific Problems Using Innovative Concepts» (March 13-15, 2024) Copenhagen, Denmark. International Scientific Unity, 2024. P. 182-184. **(особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод та

масопереносу, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту).

9. Біляєв М. М., **Козачина В. В.** Чисельне моделювання роботи дренажу на підтоплених територіях. Тези доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 23-24 травня 2024 р.). С. 182-183. **(особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод, геоміграції, створення комп'ютерних кодів).

10. Біляєв М. М., **Козачина В. В.**, Коваленко А. С., Чірков А. О., Чирва М. В. Математичне моделювання процесів масопереносу та гідродинаміки. Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». 1-3 листопада 2023 року м. Дніпро, Україна. Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». **(особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту).

11. Біляєв М. М., **Козачина В. В.**, Матусевич М. О., Савченко Д. В. Чисельне моделювання нестационарних процесів геоміграції та теплопереносу. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XIX Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 18-19 грудня 2025 р.). – Д.: УДУНТ, 2025. – 172 с. **(особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод, нейтралізації домішки, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювальних експериментів).

12. **Козачина В. В.**, Біляєв М. М., Козачина В. А. Математичне моделювання динаміки ґрунтових вод. Сучасні світові тенденції розвитку науки та інформаційних технологій : Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 30–31 травня 2024 р.). ГО «Інститут інноваційної освіти»; Науково-навчальний центр прикладної інформатики НАН України. Запоріжжя: АА Тандем, 2024. С. 83-85. **(особистий внесок:** розробка чисельних моделей

динаміки ґрунтових вод при роботі дренажної системи, прогнозування розвитку суфозії при роботі дренажу, створення комп'ютерних кодів).

13. **Козачина В. В.**, Коваленко А. С., Чірков А. О., Біляєв М. М. Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасопереносу. Наука і сталий розвиток транспорту 2024. Т. І: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 листоп. 2024р. Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 207-208. (**особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод, тепломасопереносу, створення комп'ютерного коду).

14. **Козачина В. В.**, Матусевич М. О., Біляєв М. М. Математичні моделі якості води. Наука і сталий розвиток транспорту 2025. Т. І: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 листоп. 2025р. Дніпро: УДУНТ, 2025. С. 238-239. (**особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод, тепломасопереносу, створення комп'ютерного коду).

15. **Козачина В. В.**, Чирва М. В., Коваленко А. С., Біляєв М. М., Машихіна П. Б. Математичні моделі в задачах гідродинаміки та масопереносу. Наука і сталий розвиток транспорту 2023: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 жовт. 2023 р.: у 3 т. Дніпро : УДУНТ, 2023. Т. І. С. 103-104. (**особистий внесок:** розробка чисельних моделей гідродинаміки підземних вод та масопереносу, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, тестування моделей)

ЗМІСТ

ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ	19
1.1 Проблема підтоплення територій.....	19
1.2 Фактори, що сприяють підтопленню території.....	21
1.3 Системи захисту від підтоплення.....	24
1.4 Методи дослідження процесів фільтрації та геоміграції	29
Висновки до розділу 1.....	41
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ	43
2.1 Особливості процесів, що моделюються	43
2.2 Математична модель гідродинаміки підземних вод.....	44
2.3 Модель динаміки безнапірного потоку ґрунтових вод	47
2.4 Рівняння збереження енергії	52
2.5 Визначення критичної швидкості суфозії	59
2.6 Модель транспорту домішки в підземному потоці	61
2.7 Модель масопереносу у ґрунтових водах при використанні проникного бар'єру	63
2.8 Параметри, що необхідні для практичної реалізації моделі геоміграції... ..	67
Висновки до розділу 2.....	69
РОЗДІЛ 3 ЧИСЕЛЬНІ МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ	71
3.1 Чисельна модель гідродинаміки	71
3.2 Чисельна модель динаміки ґрунтових вод.....	74
3.3 Чисельна модель геоміграції.....	79
3.4 Чисельні моделі теплопереносу у ґрунтових водах.....	83
3.5 Чисельні моделі масопереносу у ґрунтових водах в задачі про використання спеціального фільтрувального елемента	86
3.6 Верифікація чисельних моделей.....	86
Висновки до розділу 3.....	92
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДРЕНАЖУ НА ПІДТОПЛЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ	93
4.1 Моделювання роботи проникного бар'єру.....	93
4.2 Моделювання роботи системи «проникний бар'єр + непроникний бар'єр»	117
4.3 Моделювання процесу заморожування ділянки підземних вод.....	121

4.4 Моделювання роботи дренажних свердловин на підтопленій території при наявності забудови	134
Висновки до розділу 4.....	143
ВИСНОВКИ	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	146
ДОДАТОК А СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	159
ДОДАТОК Б Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес	162
ДОДАТОК В Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво	164

ВСТУП

Актуальність теми. Високий рівень ґрунтових вод призводить до підтоплення територій. Дане негативне явище є характерним для територій багатьох країн світу та пов'язане з дією як природних, так і антропогенних факторів. Як наслідок, погіршуються умови для вирощування культур, відбувається підтоплення фундаментів будинків, затоплення нульових поверхів, підвалів. З часом можуть з'являтися інші небезпечні явища, такі як просадка ґрунтів, руйнування споруд тощо. Тому актуальним завданням є розробка та удосконалення роботи дренажних систем. Про це, зокрема, наголошується у «Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» (прийнята розпорядженням Кабінету Міністрів України № 688-р від 14 серпня 2019 р.). У зв'язку з цим виникає необхідність наукового обґрунтування інженерно-захисних заходів та розроблення систем захисту від підтоплення територій; обґрунтування параметрів дренажних систем з урахуванням появи інших небезпечних процесів, факторів, наприклад, появи агресивних домішок в підземних водах, що дренуються на промислових територіях. Слід зазначити, що метод фізичного моделювання для обґрунтування параметрів дренажних систем вимагає великих часових та матеріальних витрат. Тому важливим напрямом є розробка спеціалізованих математичних моделей, що дають можливість швидко досліджувати ефективність роботи дренажної системи або окремих елементів цієї системи на етапі прийняття проектних рішень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в рамках наукових робіт Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ) «Розробка теоретичних методів експрес оцінювання техногенного навантаження на навколишнє середовище» (0123U105332), «Розробка математичних моделей для задач водокористування» (0123U105333), «Розробка методів розрахунку динаміки водних потоків та процесів тепломасопереносу» (0123U105334).

Метою дисертаційної роботи є розробка розрахункових методів для наукового обґрунтування технічних заходів, що проводяться для зниження рівня ґрунтових вод на підтоплених територіях.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені такі задачі:

- виконано аналіз методів дослідження динаміки підземних вод та геоміграції;

- виконано аналіз сучасних методів захисту територій від підтоплення;

- розроблено чисельні моделі для дослідження динаміки підземних вод при роботі дренажу;

- розроблено чисельні моделі процесу заморожування ділянки підземних вод для формуванні тимчасового бар'єру на підтоплених територіях;

- розроблено чисельні моделі для дослідження ефективності використання проникного бар'єру для захисту дренажної свердловини від забруднення;

- створено програмне забезпечення (комп'ютерні коди) для проведення обчислювального експерименту на базі розроблених чисельних моделей динаміки підземних вод та тепломасопереносу;

- здійснено верифікацію розроблених чисельних моделей;

- проведено обчислювальні експерименти та здійснено аналіз отриманих результатів дослідження.

Об'єкт дослідження – динаміка підземних вод та процеси тепломасопереносу в них.

Предмет дослідження – методи розрахунку динаміки підземних вод з урахування процесів тепломасопереносу для наукового обґрунтування технічних заходів, що реалізуються при проєктуванні системи дренажу.

Методи досліджень. Математичне моделювання динаміки ґрунтових вод та процесів тепломасопереносу в них виконано на базі фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь динаміки рідини, фільтрації, геоміграції, теплопереносу використовувались стійкі кінцево-різницеві схеми, на базі яких створені

комп'ютерні коди для проведення обчислювальних експериментів. При узагальненні матеріалів літературних джерел використовувались методи аналізу та синтезу.

Наукова новизна. Наукова новизна результатів полягає в наступному.

Вперше:

- розроблено чисельну модель, що базується на моделі потенціального руху та рівнянні масопереносу, для оцінювання ефективності використання проникного бар'єру в підземному потоці;

- розроблено чисельну модель, що базується на рівнянні безнапірного потоку підземних вод та рівнянні масопереносу, для оцінювання ефективності використання проникного бар'єру в підземному потоці;

- запропоновано використовувати систему «непроникний бар'єр + проникний бар'єр» для захисту від забруднення дренажних свердловин на підтоплених територіях;

- розроблено чисельну модель, що базується на моделі потенціального руху та рівнянні теплопереносу, для моделювання процесу заморожування ділянки підземних вод з метою формування тимчасового бар'єру на підтоплених територіях;

- розроблено математичну модель динаміки ґрунтових вод, що дозволяє, на відміну від існуючих моделей, враховувати вплив фундаментів на гідродинаміку підземних вод та визначати місця можливої появи суфозії при роботі дренажу.

Практична цінність. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

1. Запропоновані чисельні моделі динаміки підземних вод дають можливість оперативно визначати поле глибин ґрунтових вод при роботі дренажу на підтоплених територіях з урахуванням забудови та визначати місця, в яких може виникнути суфозія внаслідок роботи дренажної системи.

2. Для імплементації запропонованих чисельних моделей немає необхідності використання потужних комп'ютерів; витрата часу на проведення розрахунків на базі комп'ютерів малої та середньої потужності складає 1-2 с для

одного варіанту задачі; це дає можливість протягом одного робочого дня виконати значну кількість розрахунків та визначити найбільш раціональний варіант системи дренажу, що сприяє зменшенню часу на проведення проектних робіт.

3. Для використання розроблених чисельних моделей динаміки підземних вод та тепломасопереносу потрібна стандартна гідрогеологічна інформація; відсутня необхідність у проведенні додаткових досліджень для забезпечення моделей вхідною інформацією з метою проведення обчислювального експерименту.

4. Побудовані чисельні моделі дозволяють зменшити частку фізичного експерименту при проведенні досліджень в рамках розглянутого наукового напрямку, що сприяє зменшенню витрат на проведення проектних робіт при створенні систем дренажу.

5. Розроблені чисельні моделі використовуються у навчальному процесі УДУНТ при викладанні дисциплін «Будівництво гідротехнічних споруд», «Захист території від підтоплення», «Проектування полігонів для відходів».

6. Розроблені чисельні моделі використовуються у Філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця».

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві [4-12, 32-35, 69-70], полягає у розробці чисельних моделей, розробці комп'ютерного коду, проведенні обчислювальних експериментів, аналізі та обробці даних досліджень, постановці, проведенні експерименту, аналізі та обробці даних експерименту.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень, викладених у дисертаційній роботі, було представлено на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних, науково-практичних конференціях, зокрема: VIII міжнародна науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем», (м. Дніпро, Україна, 2023); Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і

молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2023» (м. Дніпро, Україна, 2023); Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2024» (м. Дніпро, Україна, 2024); XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Solving Scientific Problems Using Innovative Concepts» (м. Копенгаген, Данія, 2024); XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті» (м. Дніпро, Україна, 2024); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні світові тенденції розвитку науки та інформаційних технологій» (м. Одеса, Україна, 2024); XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, Україна, 2024); XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті» (м. Дніпро, Україна, 2025 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2025» (м. Дніпро, Україна, 2025).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 15 наукових праць, з яких: 6 – наукові статті у фахових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, затвердженого МОН України; 9 – тези доповідей.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота надрукована на 163 сторінках, з них основного тексту 137 сторінок; містить 98 рисунків, 7 таблиць. Список використаних літературних джерел містить 105 бібліографічних назв. У додатку наведені: список наукових праць, опублікованих за темою дисертації; документи про впровадження результатів дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Проблема підтоплення територій

Підтоплення території – негативний процес, що має тенденцію до зростання в багатьох країнах світу, при якому спостерігається підвищення рівня ґрунтових вод, а за наявності певних факторів – швидке підвищення. Чимало інженерних проєктів, особливо великих, передбачають проведення земляних робіт на водоносних ґрунтах та підтоплених територіях. У зв'язку з цим, перед початком кожного проєкту необхідно спланувати відповідну систему(и) управління і контролю ґрунтових і поверхневих вод. На практиці це можна зробити тільки за наявності інформації про ґрунтові умови та ґрунтові води, які можуть зустрітися, на підставі даних дослідження ділянки будівництва.

У [20, 22] підтопленню дано наступне визначення – це інженерно-геологічний процес, який має прояви у певних умовах природного середовища (в тому числі на міських територіях) внаслідок спільного впливу причин і факторів, як природного, так і техногенного походження, коли за розрахунковий період часу відбувається збільшення вологості ґрунтів або підняття рівня ґрунтових вод до граничних значень, за якими порушуються умови будівництва й експлуатації будинків та споруд, відбувається пригнічення та загибель зелених насаджень, засолення та заболочування земель сільськогосподарського призначення.

Згідно даних програми WHYMAP (The World-wide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme), участь в якій приймають UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), IAH (International Association of Hydrogeologists), IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Centre) тощо, площа суходолу, на якому ґрунтові води схильні до підняття до рівня, що викликає підтоплення, складає 3,6 % (рис. 1.1).

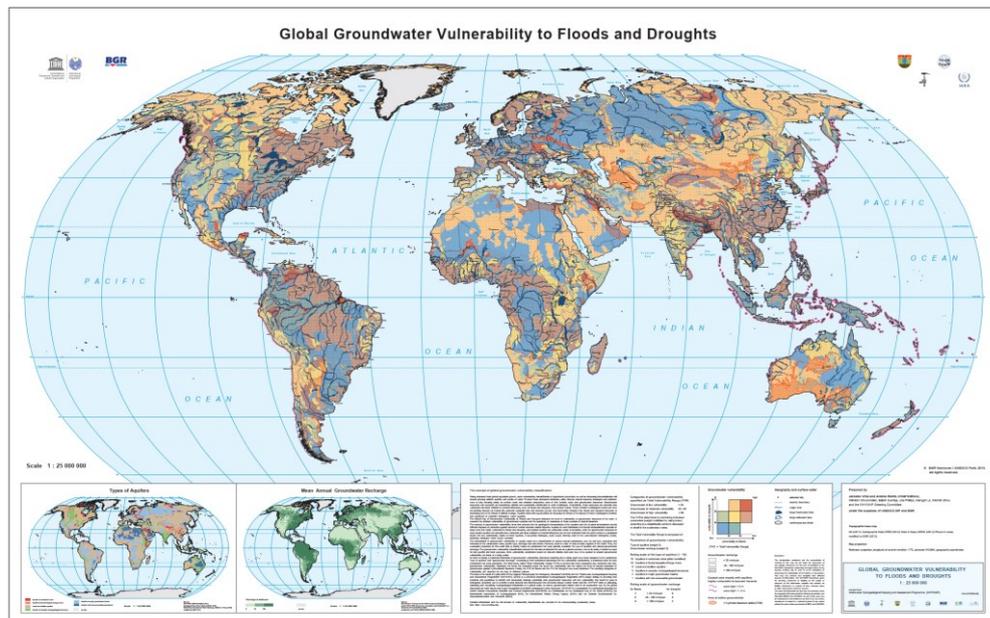


Рисунок 1.1 – Дані програми WHYMAP (<https://www.whymap.org>)

Процеси підтоплення є характерними для території України, дана проблема є доволі поширеною в нашій країні. Так, згідно з [55], станом на 1982 рік в Україні розмір підтоплених площ становила 10,11 тис. км², на 2018 рік в Україні розмір підтоплених площ становила 89,062 тис. км² (14,75 % території). Згідно з Державною програмою запобігання і боротьби з підтопленням земель [21], на 2004 рік підтоплення як природне і техногенне явище охоплювало загалом близько 70 тис. км², або 12% відсотків території нашої держави.

Ці явища – підтоплення та затоплення – порушують безперервне та надійне функціонування, експлуатацію, розвиток усіх об'єктів господарювання, створюють передумови для погіршення екологічних та соціальних умов життя, зводять нанівець дотримання нормативних санітарно-гігієнічних умов. Іншими словами, обидва ці явища є вкрай негативними.

Однак, зважаючи на значно більшу поширеність підтоплення у світі (і в Україні зокрема) порівняно з затопленням, оскільки воно порушує норми будівництва та експлуатації будівель і споруд, санітарно-гігієнічні та екологічні умови життя людей, завдає шкоди сільськогосподарським угіддям, а також через відсутність ефективних, надійних методів боротьби з підтопленням, постає

питання про науково обґрунтовані, ефективні методи проектування та розрахунків засобів боротьби з ним.

Слід відзначити, що в залежності від впливу основних чинників виділяють 3 типи підтоплення [22]:

1) підтоплення завдяки дії атмосферних опадів при непорушеному балансі ґрунтових вод;

2) техногенне підтоплення при порушеному балансі ґрунтових вод під впливом господарської діяльності (канали, водосховища тощо);

3) природно-техногенне підтоплення при слабопорушеному або порушеному балансі ґрунтових вод внаслідок збільшення їх живлення, що пов'язано зі зниженням природного дренажу ґрунту.

У [54] збитки від підтоплення територій визначено як шкоду і втрати всіх структур економіки, соціальної та природоохоронної сфери, які прямо чи опосередковано потрапили в зону впливу цього несприятливого явища або процесу і класифікуються наступним чином:

- соціально-економічні (фактори, що впливають – характер промислової та житлової забудови, види виробництва, способи ведення сільськогосподарського, лісового та рекреаційного господарства);

- еколого-економічні (фактори, що впливають – режим ґрунтових вод, кліматичні, геологічні, гідрологічні, біогенні умови);

- господарсько-економічні (фактори, що впливають – ефективність роботи водогосподарських споруд та транспортних і промислових об'єктів).

1.2 Фактори, що сприяють підтопленню території

Загалом, до причин, що викликають підтоплення (рис. 1.2), відносяться наступні чинники:

1) будівництво гідротехнічних споруд, що акумулюють воду (рис.1.3);

2) порушення стоку води через надмірну забудову;

3) втрати води через інженерні мережі;

4) незадовільна робота дренажу, зокрема зливової каналізації;

- 5) надмірне зрошення сільськогосподарських земель без улаштування дренажу або його неефективної роботи;
- 6) антропогенна діяльність людини, зокрема відкачка шахтних вод;
- 7) скорочення лісових насаджень.



Рисунок 1.2 – Підняття ґрунтових вод

<https://pp-budpostach.com.ua/ua/a115825-gruntovyh-vodah-vliyanii.html>



Рисунок 1.3 – Накопичувачі промислових рідинних відходів
(ставки-хвостосховища)

Ризик від підтоплення територій можна визначити як ймовірність негативних наслідків від сукупності шкідливих впливів на навколишнє

середовище, умови проживання населення та господарську діяльність, які спричиняють незворотну деградацію екосистем та погіршення умов роботи, відпочинку людей і діяльності промислових підприємств [54].

Слід відзначити, що навіть при задалегідь передбачених у проєкті протифільтраційних заходах для недопущення підтоплення території, з часом, може відбутись підняття рівня ґрунтових вод внаслідок появи «додаткових» факторові впливу або помилок при проєктуванні та будівництві протифільтраційного захисту. В Дніпропетровській області основним фактором підняття ґрунтових вод є інфільтрація шахтних вод зі ставків-відстійників, одним з прикладів яких є ставок-відстійник на балці Косьмінна, балці Свідовок тощо.

На рис. 1.4, в якості прикладу, наведено геологічний розріз (Дніпропетровська область), де чітко можна бачити високе стоянні рівня ґрунтових вод.

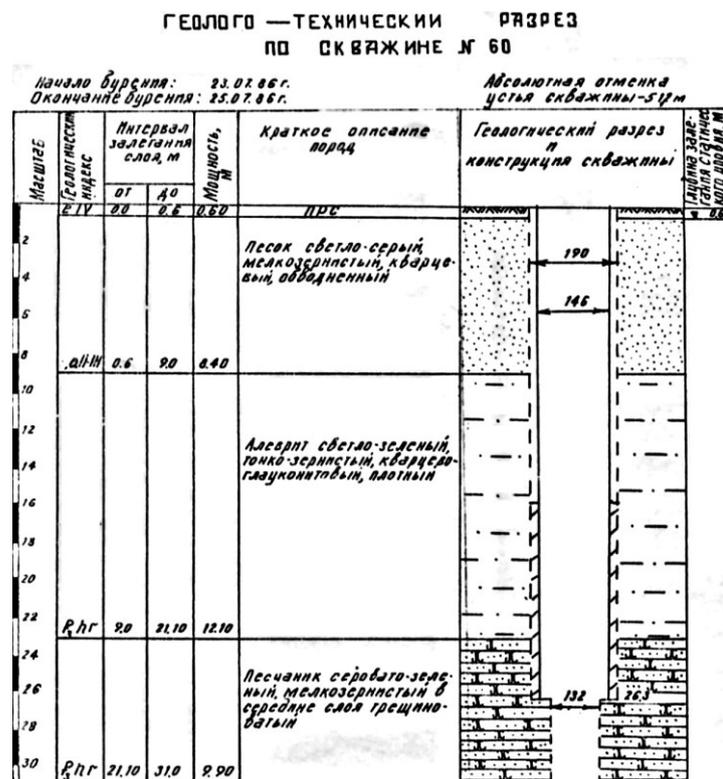


Рисунок 1.4 – Геологічний розріз (Дніпропетровська область)

Таке високе стояння рівня ґрунтових вод призводить до постійного затоплення підвалів, фундаментів будівель в регіоні (рис. 1.2).

1.3 Системи захисту від підтоплення

В рамках проблеми підтоплення можна виділити два класи технічних заходів: 1) заходи, що спрямовані на захист території від підтоплення; 2) заходи, що реалізуються для зниження рівня ґрунтових вод на вже підтоплених територіях. На рис. 1.5 схематично показано підтоплення території з забудовою, де виділено такі параметри: h_{ϕ} – глибина залягання фундаменту, h_R – глибина підземного потоку при підтопленні, h_w – «бажана» глибина при використанні системи дренажу, h_c – висота капілярного підйому ґрунтових вод.

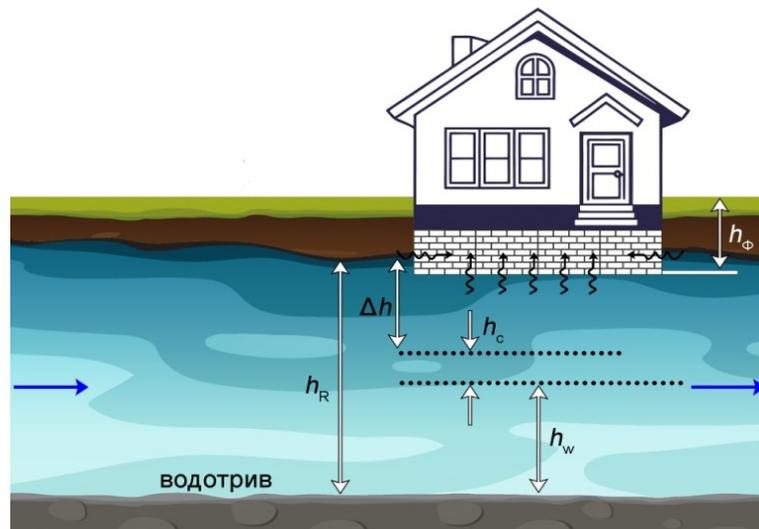


Рисунок 1.5 – Схема підтоплення селітебної території: h_R – існуючий рівень підземних вод; h_w – «безпечний» рівень підземних вод; h_c – капілярне підняття підземних вод; Δh – потрібне зниження рівня підземних вод

Захист території від підтоплення включає зниження рівня ґрунтових вод, зміну гідродинаміки підземного потоку, вибір та обґрунтування засобів захисту від підтоплення.

В даний час широко використовуються такі методи захисту від підтоплення [20] :

- штучне підвищення планувальних відміток поверхні території;
- нормативне ущільнення ґрунту при засипанні котлованів та траншей;
- забезпечення належного відведення стоку поверхневих вод;

- забезпечення ретельного виконання робіт із будівництва водонесучих мереж, штучних водомістких об'єктів;
- улаштування гідроізоляції фундаментів, заглиблених споруд і комунікацій;
- улаштування протифільтраційних екранів під промисловими накопичувачами та завіс навколо них;
- будівництво берегових, головних, перехоплюючих та інших видів дренажів для запобігання підтопленню території;
- будівництво локального дренажу (використання свердловин, лінійного дренажу тощо).

При наявності підтоплення території, у практиці зниження рівня ґрунтових вод найчастіше використовують такі види дренажу (рис.1.6-1.8):

- 1) горизонтальний дренаж (відкритий або закритий);
- 2) вертикальний дренаж;
- 3) комбінований дренаж;
- 4) огорожувальний дренаж;
- 5) профілактичний дренаж.

Якщо розглядати класифікацію дренажу з точки зору часу роботи, то виділяють тимчасовий дренаж та постійний дренаж.



Рисунок 1.6 – Прокладання дренажних труб (<https://pp-budpostach.com.ua/>)



Рисунок 1.7 – Прокладання дренажних труб (<https://starukraine.com.ua/>)



Рисунок 1.8 – Організація системи дренажу біля будинку [65]

Слід окремо виділити методи для тимчасового зниження рівня ґрунтових вод, які виключають приплив ґрунтових вод (відомі як методи виключення – exclusion methods) [88]. Ці методи можна згрупувати в три великі категорії:

1. Методи, в яких дуже низькопроникна стіна або бар'єр фізично вставляється або будується в землі (наприклад, шпунтові палі, діафрагмові стіни).

2. Методи, які зменшують проникність ґрунту in situ (напр., цементування та штучне заморожування).

3. Методи, які використовують тиск рідини в замкнених камерах, таких як тунелі, для врівноваження тиску ґрунтових вод (наприклад, стиснене повітря і тунелепрохідницькі машини для врівноваження тиску ґрунтових вод).

Для створення відсікаючих стінок або бар'єрів навколо котлованів у процесі будівництва або вже готових об'єктів у цивільному будівництві існує широкий спектр методів виключення. Ті з них, які зазвичай використовуються для контролю ґрунтових вод, узагальнені у табл. 1.

Таблиця 1. Основні методи контролю ґрунтових вод шляхом виключення

Метод	Типове застосування	Примітки
Displacement barriers (переміщувані бар'єри)		
Сталеві шпунтові палі	Відкриті котловани в більшості ґрунтів, але перешкоди, такі як валуни або дерев'яні балки, можуть перешкоджати встановленню	Можуть бути встановлені для формування постійної перегородки або використовуватися як тимчасова перегородка, при цьому палі видаляються наприкінці будівництва. Швидко встановлення. Можуть підтримувати стінки котловану відповідними розпорками. Герметизація може бути неідеальною, особливо за наявності перешкод. Вібрація та шум забивання можуть бути неприйнятними на деяких ділянках, але доступні «тихі» методи, за яких палі втискаються в ґрунт гідравлічними домкратами. Відносно дешеві
Стіна з вібраційних балок	Відкриті котловани в мулі та пісках. Не підтримуватиме ґрунт	Постійні. Вібруюча Н-подібна балка забивається в ґрунт, а потім видаляється. Після її видалення розчин впорскується через сопла біля підошви палі, утворюючи тонку мембрану з низькою проникністю. Швидко встановлення. Відносно дешеві, але витрати значно зростають з глибиною
Excavated barriers (бар'єр у виїнятому ґрунті)		
Стіна траншеї з шлему з використанням цементно-бентонітового або ґрунтово-бентонітового композиту	Відкриті котловани в мулі, пісках та гравії з проникністю до приблизно $5 \cdot 10^{-3}$ м/с	Постійні. Шлангова траншея утворює низькопроникну завісу навколо котловану. Швидко встановлюються та відносно дешеві, але вартість швидко зростає з глибиною
Бетонні діафрагмові стіни	Бічні стіни котлованів та шахт у більшості ґрунтів та слабких породах, але наявність валунів може спричинити проблеми	Постійні. Підтримують стіни котловану та часто формують бічні стіни готової конструкції. Можна закріпити в породі. Мінімальний шум та вібрація. Висока вартість може зробити метод неекономічним, якщо стіни не можна включити до постійної конструкції
Стіни з буронабивних паль (січні та суміжні)	Як бетонні діафрагмові стіни, але проникнення крізь валуни може бути дорогим та складним	Як бетонні діафрагмові стіни, але більш економічно вигідні для тимчасового використання. Герметизація між суміжними палями може бути складною, тому може знадобитися додаткове заповнення розчином або герметизація стиків.
Injection barriers (ін'єкційні бар'єри)		
Проникнення та цементация породи з використанням цементних розчинів	Тунелі та шахти в гравії, крупнозернистому піску та тріщинуватих породах	Постійний. Затирка заповнює пористі простори, запобігаючи потоку води через ґрунт. Обладнання просте та може використовуватися в обмежених просторах. Порівняно товсту зону потрібно обробити, щоб забезпечити формування

		безперервного бар'єру. Може знадобитися кілька етапів обробки
Проникнення та цементация гірських порід за допомогою хімічних та розчинних розчинів	Тунелі та шахти в середніх пісках (хімічні розчини), дрібних пісках та мулах (смоляні розчини) та тріщинуватих породах	Як і цементна цементация, але матеріали (хімічні речовини та смола) можуть бути дорогими. Мулисті ґрунти складні, і обробка може бути неповною, особливо за наявності більш проникних шарів або лінз
Струменева цементация	Відкриті виїмки в більшості ґрунтів та дуже слабких породах	Постійний. Зазвичай утворює серію перекриваючих колон суміші ґрунту та розчину. Можливі похилі отвори. Може бути брудним та створювати великі об'єми шламу. Ризик пучення ґрунту, якщо не виконувати його обережно. Відносно дорогий.
Стіни, що змішуються на місці	Відкриті виїмки в більшості ґрунтів та дуже слабких породах	Постійний. Перекриваючі колони або панелі, утворені шляхом змішування ґрунту та ін'єкційного розчину на місці. Колони, утворені за допомогою шнекового обладнання, панелі, утворені за допомогою фрезового обладнання для змішування ґрунту. Утворює мало ґрунту. Менш гнучкий, ніж струменева цементация. Відносно дорогий.
Теплові бар'єри		
Штучне заморожування ґрунту за допомогою розсолу або рідкого азоту	Тунелі та шахти. Може не працювати, якщо швидкість потоку ґрунтових вод надмірна (>2 м/день для розсолу або >20 м/день для рідкого азоту)	Тимчасовий. Утворюється «стіна» із замерзлого ґрунту (стіна замерзання), яка може підтримувати стінку шахти, а також перешкоджати доступу ґрунтових вод. Рідкий азот дорогий, але швидкий; розсіл дешевший, але повільніший. Рідкий азот є кращим, якщо швидкість ґрунтових вод відносно висока. Вартість обладнання відносно висока.
Методи тунелювання		
Стиснене повітря	Замкнуті камери, такі як тунелі, герметичні шахти та кесони	Тимчасовий. Підвищений тиск повітря (до 3,5 бар) підвищує тиск порової води в ґрунті навколо камери, зменшуючи гідравлічний градієнт та обмежуючи приплив ґрунтових вод. Потенційна небезпека для здоров'я працівників. Втрати повітря можуть бути значними у ґрунтах з високою проникністю. Високі експлуатаційні витрати та витрати на встановлення
ЕРВ ТВМ	Тунелі в більшості ґрунтів та слабких породах	Тимчасово. ТВМ проводить земляні роботи для тунелю, підтримує ґрунт і виключає потрапляння ґрунтових вод, підтримуючи балансуючий тиск рідини в камері пленуму безпосередньо за ріжучою головкою. Рідина являє собою суміш ґрунтового шламу, ґрунтових вод та кондиціонуючих агентів (таких як полімерні або бентонітові бурові розчини). ТВМ необхідно ретельно підбирати для роботи з певними ґрунтовими умовами; витрати на встановлення та експлуатацію можуть бути високими

Вони класифіковані за способом взаємодії кожного методу з ґрунтом. Переміщувані бар'єри (такі як сталеві шпунтові палі або стіни з віброваних балок) вставляють у ґрунт, витісняючи його і, отже, практично не утворюючи відкладень. На противагу цьому, виїмні бар'єри (як-от траншеї для шламу, бетонні діафрагмові стіни і стіни з буронабивних паль) припускають виїмку

матеріалу з ґрунту (тим самим утворюючи ґрунт) і заміну його матеріалом бар'єра. Ін'єкційні методи (різні форми цементації) припускають закачування і/або змішування спеціальних рідин у ґрунт, де вони застигають, блокуючи потік ґрунтових вод у порах і тріщинах. Іншою категорією методів виключення є система штучного заморожування ґрунту, за якої ґрунт змінюється тепловим способом. Ґрунт заморожується, утворюючи бар'єр із дуже низькопроникного мерзлого ґрунту і ґрунтових вод.

Вибір того чи іншого методу виключення, використовуваного для формування відсікаючого бар'єру, залежить від умов і обмежень конкретного проекту. Основними обмеженнями є бажана глибина стіни, ґрунтові умови, геометрія стіни (деякі методи можна використовувати горизонтально або з нахилом до вертикалі, тоді як інші методи обмежені вертикальним застосуванням), а також те, чи буде бар'єр постійним або тимчасовим (тимчасові бар'єри можуть бути корисними для зниження довгострокового впливу на ґрунтові води).

Бувають випадки, коли різні методи відсікання використовують у поєднанні. Подібно до того, як за наявності декількох систем водоносних горизонтів може використовуватися кілька методів відкачування, методи відсікання також можуть комбінуватися для розв'язання проблеми конкретної стратифікації на ділянці.

Особливо важливо відзначити, що при проектуванні систем дренажу, обґрунтуванні параметрів дренажу, пошуку раціонального типу дренажу потрібно мати спеціалізовані методи розрахунку, так як розрахункові методи є основним інструментом рішення багатьох задач при створенні систем дренажу підтоплених територій [1, 18, 19, 25, 28-31, 36, 38, 40, 43, 44-46, 47, 51, 52, 53, 59-63, 91, 93, 97-102].

1.4 Методи дослідження процесів фільтрації та геоміграції

При роботі дренажної системи відбувається рух ґрунтових вод внаслідок процесу фільтрації. Крім цього, дуже часто в умовах інтенсивного техногенного навантаження на водне середовище вода, що фільтрується в дренажну систему,

є забрудненою. Найчастіше така ситуація має місце в промислових регіонах та в регіонах, де є значні ставки з промисловими стічними водами (наприклад, в Павлоградському та Криворізькому районах Дніпропетровської області).

В Україні протягом значного часу були сформовані та діють широковідомі наукові школи в області дослідження процесів фільтрації, геоміграції, теплопереносу в пористому середовищі, а саме: Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Інститут геологічних наук НАН України, Інститут водних проблем і меліорації НААН України, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне), Інститут гідромеханіки НАН України, Інститут геотехнічної механіки НАН України ім. М. С. Полякова, НТУ «Дніпровська політехніка», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київський національний університет будівництва і архітектури.

Розвитку методів розрахунку фільтрації, геоміграції, дренажу присвячена значна увага в наукових працях Олійника О. Я., Долінського А. А., Тугая А. М., Хлапука А. М., Бомби А. Я., Власюка А. П., Скопечького В. В., Полякова В. Л., Садовенка І. О., Волошкіної О. С., Хорунжего П. Д., Рудакова В. К., Ковальчука В. П.

Для вирішення задач моделювання зміни гідрогеологічної ситуації та зміни хімічного складу підземних вод, температури використовується фізичний експеримент, емпіричні моделі, аналітичні моделі, чисельні моделі [2, 3, 13-17, 19, 23, 26-31, 37, 42, 43, 45-50, 55, 57, 58, 64, 65, 72, 74, 75]. На основі аналізу літературних джерел були виявлені недоліки та переваги кожного підходу [76, 78-82, 84-87, 89, 90, 94-97, 104, 105].

Фізичний експеримент. Метою проведення фізичного експерименту (у лабораторних чи польових умовах) є визначення гідродинамічних та фізико-хімічних показників міграції [16, 85, 92]. Наприклад, визначення:

- коефіцієнта фільтрації;

- пористості;
- коефіцієнта сорбції;
- коефіцієнтів дисперсії;
- напрямку руху підземного потоку;
- існуючої швидкості руху підземного потоку та таке інше.

Саме ці параметри використовуються для аналізу зміни гідрогеологічної ситуації, зміни хімічного складу підземних вод та моделювання за допомогою математичних моделей.

Польові вимірювання використовуються для моніторингу підземних вод поблизу великих джерел техногенного забруднення (ставки-відстійники, хвостосховища тощо) з метою аналізу зміни режиму руху, рівня підземних вод та хімічного складу підземних вод.

Переваги фізичного моделювання:

1. Можливість отримання реальних даних для аналізу динаміки процесів геоміграції у конкретному регіоні, з'ясування закономірностей формування ореолів забруднення тощо.

2. Дані фізичного експерименту можна використовувати для «налаштування» математичної моделі, орієнтованої на вирішення завдань геоміграції для конкретного об'єкту.

3. Результати фізичного експерименту можуть бути використані для розробки емпіричних моделей прогнозу якості підземних вод.

Недоліки фізичного експерименту:

1. Великі економічні витрати (наприклад, необхідне використання значної кількості свердловин для отримання експериментальних даних процесів фільтрації та геоміграції, рис. 1.9, рис.1.10).

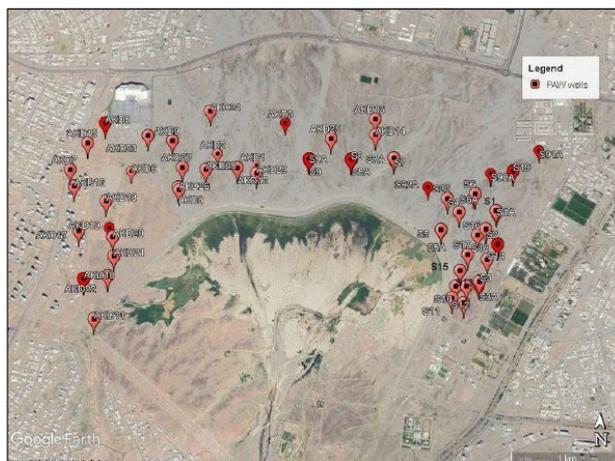


Рисунок 1.9 – Спостережні свердловини в області дослідження [92]

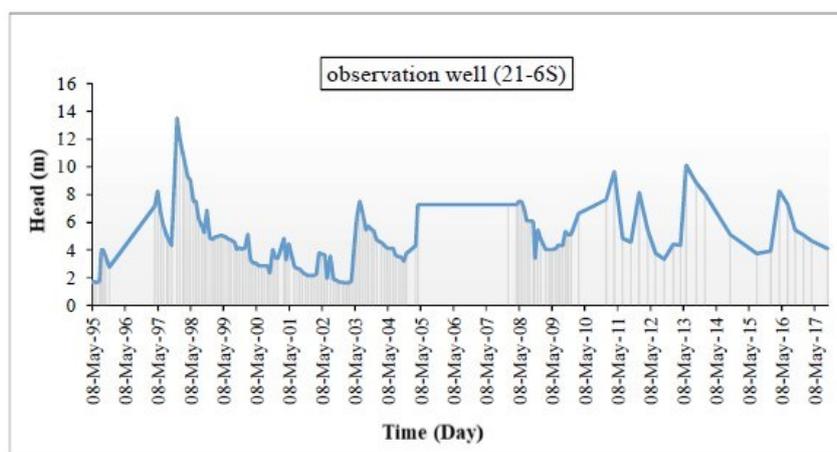


Рисунок 1.10 – Коливання рівня ґрунтових вод в спостережній свердловині для різних моментів часу [92]

2. Необхідність кваліфікованих кадрів (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Підготовка обладнання у польових умовах [85]

3. Значний час на підготовку та проведення експерименту (наприклад, буріння свердловин, встановлення обладнання у польових умовах, лабораторії тощо) (рис. 1.10).

4. Достатньо великий час на отримання, аналіз та обробку результатів вимірювань. Це пов'язано з тим, що процеси геоміграції дуже повільні, тому потрібно значно більше часу для отримання необхідної кількості даних.

5. Проблема «інтерпретування» даних вимірювань для низки випадків, а також наявність «побічних» факторів, здатних спотворити дані експерименту, особливо в польових умовах.

6. Неможливість проведення польових експериментів у ряді випадків (нестача ресурсів, нестача часу на встановлення обладнання тощо).

В цілому можна сказати, що фізичний експеримент є потужним засобом при вирішенні певного кола задач геоміграції. Тим не менш, фізичний експеримент не може бути щоденним інструментом вирішення різноманітних прогностичних завдань, пов'язаних із проблемою забруднення підземних вод, прогнозування зміни гідрогеологічної ситуації та зміни хімічного складу підземних вод. Слід зазначити, що використання лабораторного експерименту для обґрунтування параметрів дренажу є суттєво обмеженим, що пов'язано з тим, що створення в лабораторних умовах моделюючої установки та проведення досліджень потребує значного часу. Крім цього, при проведенні експериментального дослідження необхідним є виконання критеріїв моделювання.

Альтернативним підходом є застосування методу математичного моделювання. Причинами того, що метод математичного моделювання є найважливішим інструментом вивчення процесів геоміграції, дослідження зміни гідрогеологічної ситуації та хімічного складу підземних вод є наступними:

1. Значно менші економічні витрати порівняно з фізичними експериментами.

2. Можливість швидкого отримання потрібних прогностичних даних щодо зміни «поведінки» об'єкту.

3. Наявність в даний час добре розвинених інструментів математичного моделювання процесів фільтрації та геоміграції.

4. При проведенні фізичних експериментів дослідник не може «зазирнути» та побачити, як формується зона забруднення у підземному потоці (на відміну, наприклад, від формування областей забруднення при викидах з промислових труб), але використання математичного моделювання дає можливість «візуалізувати» форму та інтенсивність областей забруднення у підземному потоці.

5. Математичне моделювання дає можливість швидко отримати «зворотну реакцію» підземних вод на зміну тих чи інших параметрів: наприклад, спрогнозувати, як зміниться рівень забруднення підземних вод при збільшенні дебіту свердловин, зміні місця розташування свердловин та інше, що є вкрай важливим, особливо на етапі проектування систем дренажу.

У межах наукового напрямку «математичне моделювання» можна виділити наступні види моделей:

1. *Емпіричні моделі.* Це група моделей, які застосовуються, в основному, для експрес-рішення задач фільтрації при дренажу та масопереносу. Ці моделі мають вигляд простих алгебраїчних формул. При побудові емпіричних моделей використовуються дані польових спостережень та результати фізичного експерименту.

Прикладом емпіричної моделі для класу задач, що розглядаються, є модель Зіхарда для визначення радіусу впливу свердловини:

$$R = 3000z_0\sqrt{k},$$

де z_0 – зниження горизонту води в свердловині; k – коефіцієнт фільтрації.

Переваги емпіричних моделей:

1. Простота розрахункових залежностей (у розрахункових формулах немає спеціальних функцій, типу функцій Бесселя, немає інтегралів тощо).

2. Для застосування моделей немає потреби використання комп'ютера.

3. Для практичного застосування моделей цього класу не потрібні висококваліфіковані кадри.

Недоліки емпіричних моделей:

1. Моделі можуть застосовуватися тільки для умов, за яких були отримані дані експериментів, на основі яких створена емпірична модель; застосування цих моделей для інших умов вимагає наукового обґрунтування.

2. Моделі використовують для розрахунку обмежену кількість фізичних параметрів, тому ці моделі не дозволяють отримати достатньо повну картину процесу геоміграції (наприклад, вони не дають можливості визначати інтенсивність та форму області забруднення в підземному потоці).

3. Моделі можуть містити параметри, які не мають фізичного сенсу (як тоді ці параметри перевірити?).

Слід наголосити, що емпіричні моделі застосовуються в практичних розрахунках для визначення деяких параметрів геоміграції (наприклад, коефіцієнта дисперсії).

В рамках сучасних вимог до якості прогностичної інформації застосування емпіричних моделей для вирішення багатофакторних задач геоміграції є недоцільним.

Аналітичні моделі. Аналітичні моделі в задачах фільтрації та тепломасопереносу є потужним дослідницьким інструментом та інструментом, що використовується для вирішення прикладних задач по проектуванню дренажу. Аналітичні моделі – це розрахункові залежності, які є точним рішенням рівнянь фільтрації або тепломасопереносу. До групи аналітичних моделей також відносяться інженерні формули розрахунку різного типу дренажів – це розрахункові методи гідравліки (визначення кривої депресії при роботі свердловини, визначення витрати дренажної системи тощо). Слід відзначити, що при вирішенні задач, пов'язаних з проектуванням дренажних систем, широко використовуються саме гідравлічні методи розрахунку. Наприклад, при розрахунку глибини потоку ґрунтових вод у випадку проектування горизонтального однолінійного головного і берегового дренажу, для визначення ординат кривої депресії H_x , використовується наступна гідравлічна залежність (ДСТУ-Н Б В. 1.1-38:2016):)

$$H_x = \sqrt{H_0^2 + (H_1^2 - H_0^2) \frac{x}{l_1}},$$

де H_0 , H_1 – напори над горизонтальним водотривом; l_1 – відстань від дрени до межі потоку; x – відстань від стінки дрени до перерізу, де визначається H_x .

Для отримання розрахункових залежностей, в основі яких лежить інтегрування рівнянь фільтрації та тепломасопереносу, використовують різні математичні методи інтегрування: метод конформних відображень, метод Фур'є, метод потенціальних течій тощо.

На базі аналітичних моделей вирішено широке коло фільтраційних задач, що виникають при проєктуванні гідротехнічних споруд, дренажів, техногенному забрудненні підземних вод, засоленні ґрунтів тощо. За кордоном широко використовуються комерційні пакети *CXTFIT*, *STANMOD*, що реалізують аналітичні моделі в галузі фільтрації та геоміграції.

Переваги аналітичних моделей:

1. Результати розрахунку за цими моделями є «беззаперечним» математичним результатом, оскільки дані моделі є «точним» розв'язанням задач геоміграції, фільтрації.

2. Аналітичну модель можна використовувати для верифікації чисельних моделей.

3. Для низки випадків (наприклад, моделювання роботи свердловини), моделі дозволяють отримати задовільний розв'язок реальної прикладної задачі (рис. 1.12, застосування методу потенціальних течій).

4. Моделі можна використовувати для вирішення «зворотної» задачі – за даними експерименту визначати, наприклад, інтенсивність джерела техногенного забруднення.

5. Моделі можна застосовувати для дослідження «значимість» впливу того чи іншого фізичного параметра на процес фільтрації та геоміграції.

6. Моделі можна застосовувати для вирішення складних реальних завдань за відсутності на початку досліджень достатньої кількості вхідної інформації.

7. Отримання рішення прогностичної задачі на базі аналітичної моделі в багатьох випадках не потребує використання комп'ютера.

Недоліки аналітичних моделей:

1. Розрахункова залежність може містити спеціальні функції, інтеграли, що значно ускладнює практичне застосування моделі.
2. Потрібен певний рівень кваліфікації користувача.
3. Область застосування аналітичних моделей значно обмежена. Це пов'язано з тим, що аналітичне рішення задач фільтрації та геоміграції можна отримати тільки при використанні суттєвих спрощень у постановці задачі, наприклад, при розгляді лише одновимірної течії. Це значно звужує діапазон практичного застосування моделей цього класу.

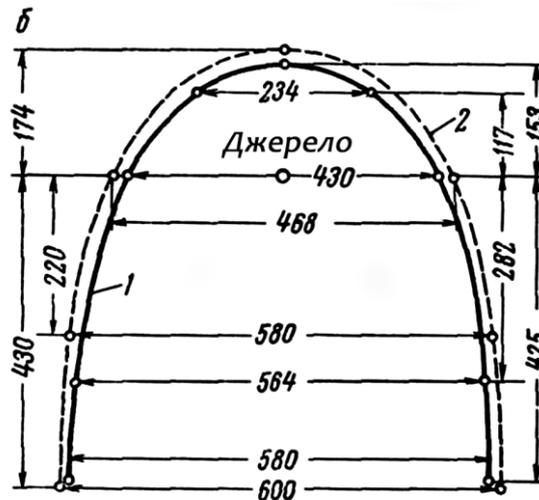


Рисунок 1.12 – Поле змочування біля свердловини (зіставлення теоретичних (аналітична модель) та експериментальних даних з розрахунку нагнітальних свердловин):

1 – теоретична крива; 2 – дослідна крива (Вахрамєєв І. І.)

Чисельні моделі. Чисельні моделі є найбільш потужним інструментом рішення різних задач механіки суцільного середовища [28, 48, 66-71, 75, 81, 83, 92]. Чисельні моделі створюються шляхом застосування різних наближених (чисельних) методів вирішення крайових задач фільтрації та геоміграції [15, 16, 23, 24, 48, 73, 83, 96, 103]. При вирішенні завдань фільтрації та геоміграції

найчастіше використовують такі чисельні методи інтегрування моделюючих рівнянь:

- 1) кінцево-різницеві методи;
- 2) метод скінченних елементів;
- 3) комплексний метод граничних елементів (чисельно-аналітичний метод).

Використання чисельних моделей на практиці отримало назву «чисельне моделювання».

Особливістю чисельних моделей є те, що для їх застосування обов'язково використовується комп'ютер, тобто для застосування чисельної моделі необхідно розробити комп'ютерний код (програму для розрахунку на комп'ютері). Цей код є інструментом (*tool*) у проведенні наукових досліджень. Тому користувачі чисельних моделей поділяються на такі групи:

1. Користувачі, які не вміють розробляти чисельні моделі та створювати на їх основі комп'ютерні коди, тому вони використовують готові програмні продукти, тобто комерційні коди (наприклад, код COMSOL).

2. Користувачі, які використовують комерційні коди, але можуть самостійно розробити комп'ютерну програму, яка дозволяє результат, отриманий за допомогою комерційного коду, «доопрацювати» під конкретну ситуацію (наприклад, самостійно розроблений код, який додатково обчислює ризик появи суфозії на конкретній ділянці руху підземних вод).

3. Користувачі, які самостійно розробляють багатofакторні чисельні моделі та створюють на їх основі комп'ютерні коди (авторські коди).

У практиці розв'язання задач фільтрації, геоміграції широко використовують такі комерційні коди:

- *FEFLOW* – чисельне моделювання задач фільтрації на базі методу скінченних елементів (МСЕ), штучне заморожування підземних вод (рис. 1.13);

- *HST3D* – чисельне моделювання процесів забруднення підземних вод при витоках зі сховищ, інтрузія солоних вод, закачування стоків;

- *MODFLOW* – чисельне моделювання (метод скінченних різниць) широкого кола прикладних задач геоміграції та фільтрації (витік води з річок в підземні води, витік стоків зі сховищ тощо) (рис. 1.14);

- *MT3D* – математичне моделювання процесів масопереносу в підземних водах;

- *SEWAT* – комбінація пакетів *MODFLOW+MT3D*;

- *SUTRA* – рішення 2D задач геоміграції з урахуванням сорбції, теплопереносу, розпаду домішки;

- *SWIMv1/SWIMv2* – моделювання задач фільтрації та міграції у ґрунтовому шарі;

- *HYDRUS-1D* – рішення одновимірних задач фільтрації;

- *HYDRUS-2D/3D* – чисельне рішення задач тепломасопереносу;

- *PHREEQC* – чисельне моделювання масопереносу з урахуванням хімічних реакцій;

- *GMS (Groundwater Model System)* – чисельне рішення задач геоміграції.

Наявність такого значного кола комерційних програм свідчить про те, що не існує універсального коду для моделювання багатопараметричних фільтраційних задач та задач геоміграції.

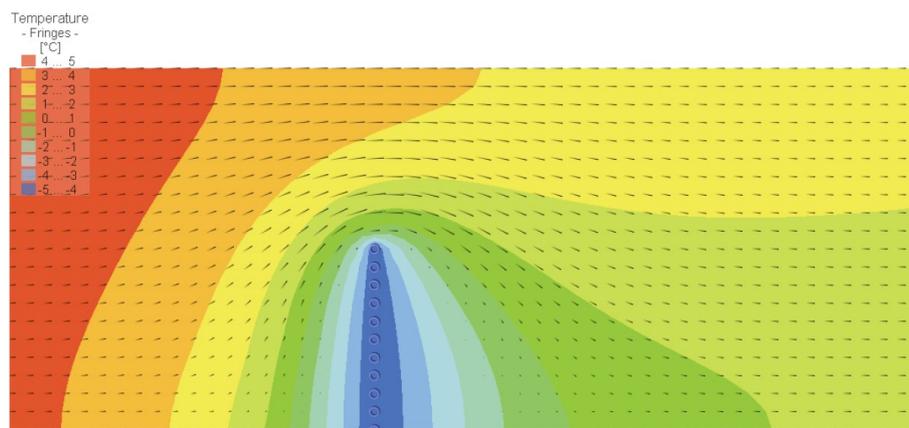


Рисунок 1.13 – Температурне поле при штучному заморожуванні, чисельне моделювання на базі комерційного пакету FEFLOW [76]

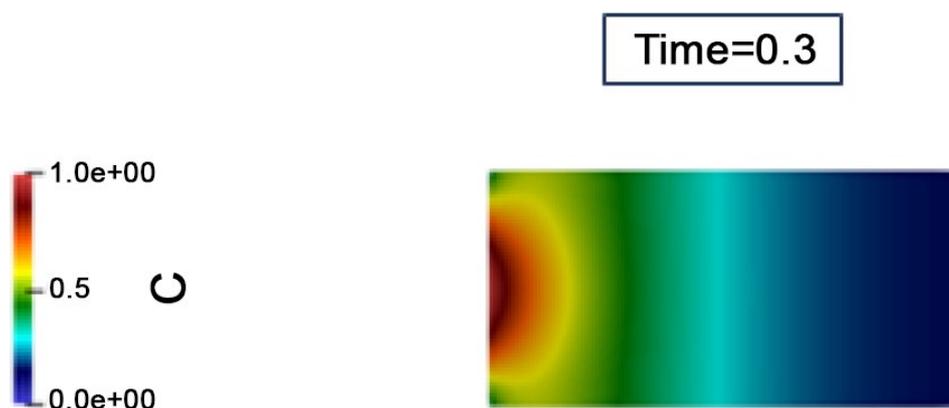


Рисунок 1.14 – Область забруднення підземних вод, розрахунок на базі методу скінченних елементів [105]

Переваги чисельних моделей:

1. Можливість врахування при моделюванні значної кількості фізичних чинників, які впливають на процес фільтрації, формування ореолів забруднення тощо.

2. Широкий робочий діапазон (можливість моделювання динаміки підземних вод та процесів геоміграції в напірних підземних потоках, безнапірних і т. д.).

3. Потреба у значно меншій кількості часу для отримання прогностичних даних проти польових досліджень.

4. Можливість використання для вирішення «зворотної» задачі – за даними експерименту визначати, наприклад, інтенсивність джерела техногенного забруднення.

Недоліки чисельних моделей та комерційних кодів:

1. При використанні комерційних кодів користувач повинен мати ліцензію на використання комерційного коду в наукових дослідженнях (тобто користувач повинен пройти офіційне навчання).

2. Комерційні коди орієнтовані на вирішення конкретного класу завдань у межах тієї чи іншої математичної моделі, граничних умов, сітки. Користувач не може самостійно налаштувати комерційний код на рішення іншого класу задач.

3. В областях з великим градієнтом функцій комерційні коди можуть давати «збій», тобто отримання рішення в цьому випадку є неможливим.

4. Висока вартість ліцензійних комерційних кодів.

5. Вимога високої кваліфікації користувача.

6. Значний час при розрахунках на комп'ютерах малої та середньої потужності.

7. Необхідна детальна вхідна інформація для проведення обчислювального експерименту, що не є завжди доступною, особливо на початку проектних робіт. Отримання такої інформації потребує часу та значних коштів.

Слід зазначити, що застосування чисельного моделювання в даний час є основним трендом у вирішенні проблем геоміграції.

Висновки до розділу 1

1. Виконано аналіз проблеми підтоплення території України. Аналіз показав, що даний негативний процес має місце в багатьох регіонах України та приносить екологічні та соціальні збитки.

2. Проведено аналітичний огляд літературних джерел, який показав, що існують різні методи зниження рівня підземних вод на підтоплених територіях. На етапі проектування вибір того чи іншого методу дренажу визначається шляхом попереднього оцінювання ефективності майбутньої системи дренажу методом математичного моделювання.

3. Виконаний аналіз сучасних методів прогнозування динаміки підземних вод показав, що використання фізичного експерименту є дуже обмеженим. Це пов'язано зі значним часом на постановку експерименту та високими економічними витратами. Фізичний експеримент, в значній мірі, спрямований на визначення різних гідрологічних параметрів, що далі використовуються в теоретичних розрахунках при проектуванні систем дренажу.

4. Аналіз літературних джерел показав, що при проектуванні систем дренажу широко використовуються теоретичні методи дослідження динаміки підземних вод. Значна кількість розрахунків здійснюється шляхом використання емпіричних та аналітичних моделей, але ці моделі мають певні обмеження, що в

ряді випадків не дозволяє їх використовувати для рішення задач динаміки підземних вод.

5. На основі вивчення літературних даних виявлено, що сучасним напрямом дослідження динаміки підземних вод, процесів геоміграції є використання чисельних моделей.

6. Існує певний дефіцит прикладних моделей, що дозволяють комплексно вирішувати задачі динаміки підземних вод та тепломасопереносу. Використання комерційних програмних комплексів (наприклад, «MODFLOW») потребує високої кваліфікації користувача та значних економічних витрат через їх високу вартість; крім цього, потрібна детальна вхідна інформація для проведення обчислювального експерименту, що не є завжди доступною, особливо на початку проектних робіт. Отримання такої інформації потребує часу та значних коштів.

7. На основі вивчення літературних даних виявлено необхідність у створенні ефективних і економічних методів чисельного дослідження динаміки підземних вод та процесів тепломасопереносу в них.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ

В даному розділі розглядаються математичні моделі для наукового обґрунтування ряду захисних заходів, що проводяться для зниження рівня ґрунтових вод на підтоплених територіях.

2.1 Особливості процесів, що моделюються

Розв'язання задачі з визначення ефективності заходів, що проводяться для зменшення рівня ґрунтових вод, ґрунтується на розрахунку динаміки зміни глибини потоку з плином часу за техногенного впливу на потік.

Розглянутий клас задач має низку специфічних особливостей, що значно ускладнюють процес математичного моделювання:

- нерівномірна течія;
- зміна швидкості підземного потоку з часом в кожній точці області дослідження;
- необхідність урахування нерівномірного та нестационарного поля температури в ділянці, де реалізується спосіб заморозки потоку;
- необхідність врахування більшої кількості факторів, що впливають на процес фільтрації (коефіцієнт фільтрації, пористість ґрунту, змінна глибина підземного потоку);
- необхідність врахування впливу перешкод (фундаменти будинків тощо) на динаміку ґрунтових вод при роботі дренажних систем;
- необхідність здійснювати моделювання гідродинаміки та теплопереносу в умовах, коли змінюється геометрія розрахункової області внаслідок формування льоду всередині потоку підземних вод;
- вплив застосовуваних інженерних методів захисту (свердловини) на динаміку руху підземних вод.

Наявність таких факторів приводить до того, що єдиним шляхом для рішення задач даного класу є використання багатofакторних фундаментальних моделей механіки суцільного середовища та методу чисельного моделювання.

2.2 Математична модель гідродинаміки підземних вод

Дренаж підтоплених територій відноситься до особливо важливих та складних задач в галузі динаміки підземних вод. При розробці проєкту дренажу використовують різні моделі, що були висвітлені в попередньому розділі. Вибір тієї або іншої моделі залежить від: наявності та повноти гідрологічної інформації для проведення розрахунків; постановки задачі, яку вирішують на певному етапі проєктування; кваліфікації фахівця тощо.

Розглянемо виведення рівняння гідродинаміки для моделювання руху потоку підземних вод, яке дає можливість врахувати найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на зміну глибини підземних вод та має фізичне обґрунтування.

Виділимо в підземному потоці контрольний елемент у вигляді паралелепіпеда зі сторонами dx , dy , dz (рис. 2.1):

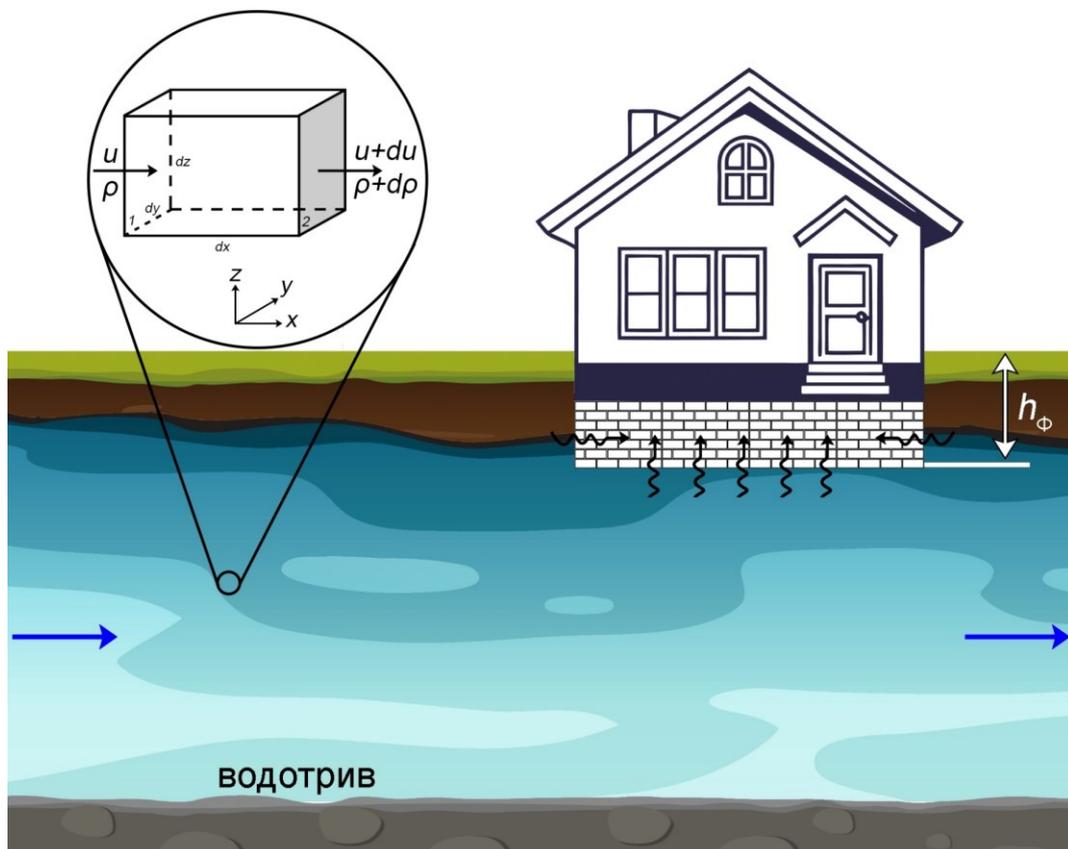


Рисунок 2.1 – Контрольний об'єм: 1, 2 – грані контрольного об'єму; h_{ϕ} – глибина закладання фундаменту

Позначимо через u швидкість підземного потоку грані 1. Прийнемо, що густина водного середовища на цій грані ρ . Для грані 2, що розташована від грані 1 на відстані dx , маємо:

$$u + du = u + \frac{\partial u}{\partial x} dx,$$

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

За проміжок часу dt через грань 1 всередину контрольного об'єму надійде маса рідини

$$\rho u dy dz dt.$$

Через грань 2 за проміжок часу dt з контрольного об'єму вийде маса рідини

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

Зміна маси рідини в контрольному об'ємі за час dt в напрямку вісі OX складає:

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

Зміна маси рідини в контрольному об'ємі внаслідок руху вздовж осей OY та OZ складає, відповідно,

$$\frac{\partial v\rho}{\partial y} dx dy dz dt,$$

$$\frac{\partial w\rho}{\partial z} dx dy dz dt,$$

де v, w – компоненти вектора швидкості водного потоку вздовж осей OY та OZ .

Тоді в контрольному об'ємі $dx dy dz$ за проміжок часу dt накопичиться маса

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dt dx dy dz.$$

Накопичення маси, викликане рухом водного потоку через границі контрольного об'єму, дорівнює:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dt dx dy dz + \frac{\partial u\rho}{\partial x} dx dy dz dt + \frac{\partial v\rho}{\partial y} dx dy dz dt + \frac{\partial w\rho}{\partial z} dx dy dz dt = 0.$$

Тоді баланс маси для контрольного об'єму можна записати так:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u \rho}{\partial x} + \frac{\partial v \rho}{\partial y} + \frac{\partial w \rho}{\partial z} = 0.$$

Будемо враховувати, що потік є стаціонарним, тобто $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, а також те, що

рідина є нестисливою: $\rho = \text{Const}$. З урахування цього отримуємо наступне рівняння:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2.1)$$

де u, v, w – проєкції вектора швидкості \vec{V} водного середовища на вісі декартової системи координат. Це рівняння називається рівнянням нерозривності.

Якщо зробити припущення, що течія є потенціальною, тоді існує залежність:

$$\vec{V} = \text{grad}P, \quad (2.2)$$

де P – потенціал швидкості.

Вирази для компонент швидкості потоку можна записати так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}, w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (2.3)$$

Підставляючи вирази (2.3) в (2.1) отримуємо рівняння для визначення потенціалу швидкості (рівняння Лапласа):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0. \quad (2.4)$$

Для рівняння (2.4) граничні умови мають вигляд [24, 37]:

– на твердих стінках:

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

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до стінки;

– на вхідній границі (границя втікання водного потоку):

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

де V_n – відоме значення швидкості;

– на вихідній границі (границя виходу потоку):

$$P = P_0 + Const \text{ (умова Діріхле).}$$

Якщо розглядається двовимірний модель, то маємо наступне рівняння для потенціалу швидкості та компонент вектора швидкості:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (2.5)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y} \quad (2.6)$$

Слід відзначити, що модель (2.5) та залежності (2.6) будуть використовуватись далі для рішення прикладних задач.

До переваг розглянутої математичної моделі гідродинаміки відносяться:

1. Модель має універсальний характер, тобто, не «прив'язана» до однієї конкретної рідини.
2. Модель виражає фундаментальний закон механіки суцільного середовища – закон збереження маси.
3. Модель є коректною як для стаціонарного, так і нестаціонарного руху рідини.

Недоліками даної моделі є:

1. Складність рішення рівняння для потенціалу швидкості та неможливість отримання аналітичного рішення задачі для реальних умов.
2. Модель не враховує в'язкісні ефекти.

2.3 Модель динаміки безнапірного потоку ґрунтових вод

Робота дренажної системи на підтопленій території призводить до зміни положення кривої депресії. Для моделювання зміни положення кривої депресії потрібно використовувати спеціальні математичні моделі. Розглянемо іншу модель для опису руху підземних вод, що мають вільну поверхню.

Виділимо в потоці безнапірних ґрунтових вод нескінченно малий елемент довжиною dx , що обмежений з одного боку глибиною h , а з іншого боку має глибину $h+dh$ (рис. 2.2).

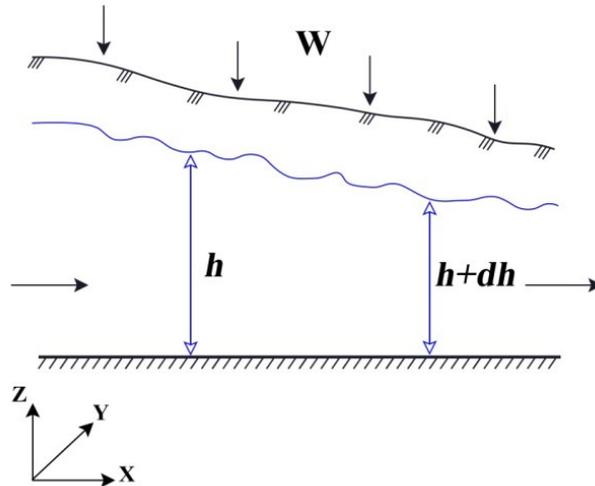


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема

Запишемо рівняння балансу маси для цього елемента в потоці ґрунтових вод:

- якщо в напрямку x компонента вектора швидкості підземного потоку дорівнює u , то за час dt крізь сторону висотою h всередину елемента зайде маса рідини

$$m_1 = \rho u h dy dt ;$$

- за час dt з цього елемента через сторону висотою $h+dh$ вийде маса води

$$m_2 = (\rho u h + d(\rho u h)) dy dt = \left(\rho u h + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} dx \right) dy dt .$$

Таким чином, зміна маси води всередині елемента буде дорівнювати (якщо нехтувати доданками другого порядку малості):

$$m_2 - m_1 = \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} dx dy dt. \quad (2.7)$$

Слідуючи таким же міркуванням отримаємо, що зміна маси води в елементі за час dt при течії в напрямку вісі Y (v – компонента вектора швидкості потоку в цьому напрямку) дорівнює:

$$m_2 - m_1 = \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} dx dy dt. \quad (2.8)$$

За час dt маса води у виділеному елементі може також змінитися внаслідок інфільтрації води з поверхні землі в кількості W , тоді приріст маси буде дорівнювати:

$$dm = \rho W dx dy dt.$$

Слід відзначити, що маса води у виділеному елементі дорівнює:

$$m = \rho \varepsilon \eta h dx dy$$

де ρ – щільність рідини, ε – об'ємна порозність, η – ступінь насиченості.

Зміну маси води у виділеному елементі, з урахування попередніх міркувань та залежностей (2.7), (2.8), можна записати так:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon \eta h)}{\partial t} dx dy = - \left(\frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} \right) dx dy + \rho W(x, y) dx dy,$$

або

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon \eta h)}{\partial t} = - \left(\frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} \right) + \rho W(x, y).$$

Якщо знехтувати стисливістю та зміною з часом параметрів ε , η , то маємо:

$$\varepsilon \eta \frac{\partial h}{\partial t} = - \left(\frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} \right) + \rho W(x, y). \quad (2.9)$$

Будемо враховувати, що швидкість фільтраційного потоку визначається за законом Дарсі, тобто:

$$u = -k \frac{\partial H}{\partial x}, v = -k \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (2.10)$$

де H – п'єзометричний напір.

Якщо зробити припущення, що водотрив горизонтальний, тобто $grad(H) = grad(h)$, то рівняння (2.9) можна записати так:

$$\varepsilon\eta \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kh \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kh \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W(x, y). \quad (2.11)$$

Якщо, згідно Буссінеску, зробити припущення, що в правій частині рівняння $h = h_s = const$, то замість рівняння (2.10) отримаємо наступне лінеаризоване рівняння:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kh_s \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(kh_s \frac{\partial h}{\partial y} \right) + W(x, y), \quad (2.12)$$

де $\mu = \varepsilon\eta$.

Відзначимо, що в рівнянні (2.12) параметр W дає можливість здійснити математичний опис таких явищ:

1. $W > 0$ – це додатковий приплив води у підземний водоносний шар (опади, робота поглинаючої свердловини)
2. $W < 0$ – це відкачка води від підземного водоносного шару (робота свердловини, випарювання води з вільної поверхні).

При проведенні «пілотних» розрахунків (коли ще не відомо достатньо точно значення гідрофізичних параметрів для конкретного регіону, де планується використання захисних заходів по зниженню рівня ґрунтових вод), рівняння (2.12) спрощується та для моделювання використовується таке рівняння фільтрації:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + W, \quad (2.13)$$

де h – глибина безнапірного підземного потоку; k – коефіцієнт фільтрації водоносного шару; μ – нестача насичення (водовіддача); h_m – середня глибина підземного потоку.

Математична модель обов'язково включає формулювання граничних умов в області дослідження (рис. 2.3).

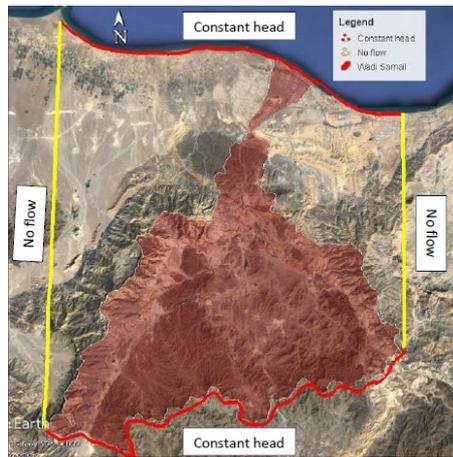


Рисунок 2.3 – Схематизація області дослідження при формулюванні граничних умов [92]

Для рівняння динаміки безнапірного руху підземних вод реалізуються такі крайові умови:

1. При $t=0$ задається рівень ґрунтових вод в області дослідження.
2. На межі, де потік входить в область дослідження, задається значення глибини $h=h_1$, де h_1 – відома глибина потоку.
3. На межі, де потік виходить з області дослідження, задається значення глибини $h=h_2$, де h_2 – відома глибина потоку.

4. На твердих границях: $\frac{\partial h}{\partial n} = 0$, де n – одиничний вектор нормалі до границі.

Для стаціонарного випадку рівняння руху підземного потоку може бути записано у вигляді:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (2.14)$$

Перевагами розглянутих математичних моделей динаміки безнапірного потоку ґрунтових вод є:

1. Моделі мають універсальний характер, тобто не «прив'язані» до конкретного безнапірного потоку ґрунтових вод в конкретному регіоні, конкретних гідрологічних параметрів, конкретного типу рідини.

2. Моделі виражають фундаментальний закон механіки суцільного середовища – закон збереження маси.

3. Моделі є коректними як для стаціонарного, так і нестаціонарного руху рідини.

4. Моделі дають можливість аналізувати динаміку ґрунтових вод при різних значеннях коефіцієнтів фільтрації.

5. Моделі дають можливість здійснювати аналіз впливу свердловин на зниження рівня ґрунтових вод при довільному розташуванні свердловин в області дослідження.

Недоліками розглянутих математичних моделей є:

1. Неможливість отримання аналітичного рішення для реальних умов.
2. Необхідність використання чисельних методів для рішення моделюючого рівняння.

3. Для отримання науково обґрунтованих даних на базі моделей фільтрації безнапірного потоку підземних вод потрібно мати реальні дані стосовно процесу, що моделюється: глибина потоку на різних ділянках, значення коефіцієнта фільтрації тощо. Це потребує значного часу та коштів на отримання таких даних для конкретної ділянки, де планується розташування системи дренажу.

Вибір математичної моделі у вигляді (2.11)-(2.14) залежить від:

- 1) наявності коректної вхідної гідрологічної інформації;
- 2) мети математичного моделювання;
- 3) часу, що виділяється на проведення теоретичних досліджень;
- 4) кваліфікаційного рівня розробника моделі.

2.4 Рівняння збереження енергії

Заморожування окремих ділянок підземних вод для наступного дренажу води з цих ділянок відноситься до активно використовуваного засобу локального дренажу (рис. 2.4-2.8). Сам метод був запропонований германським інженером Ф. Н. Roetch. В спеціальні свердловини закачується холодоагент (наприклад, рідкий азот) (рис. 2.4, 2.5), під дією якого відбувається локальне заморожування ґрунту та формується штучна «стінка» (рис. 2.6). Слід підкреслити, що

комплексні наукові дослідження процесів тепломасопереносу в умовах фільтрації були проведені в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а також в Інституті технічної теплофізики НАН України під керівництвом акад. Долінського А. А. (експериментальні та теоретичні дослідження Долінського А. А., Басюка Б. І., Авраменко А. А., Резакової Т. А., Морозова Ю. П.).

Для аналізу ефективності процесу заморожування підземних вод потрібно визначити динаміку зміни температури з часом у водоносному шарі та процес формування льоду всередині підземного потоку [2, 42, 76, 80, 82, 87].

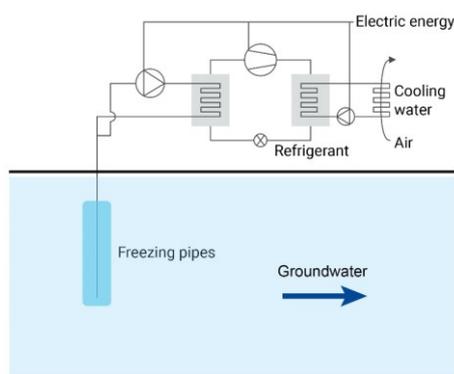


Рисунок 2.4 – Схема подачі реагенту в підземний потік для його заморожування (<https://www.geofrost.no/en/>)

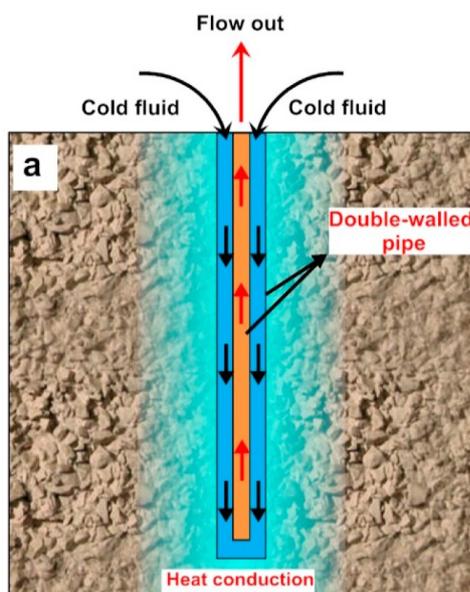


Рисунок 2.5 – Свердловина для штучного заморожування [80]

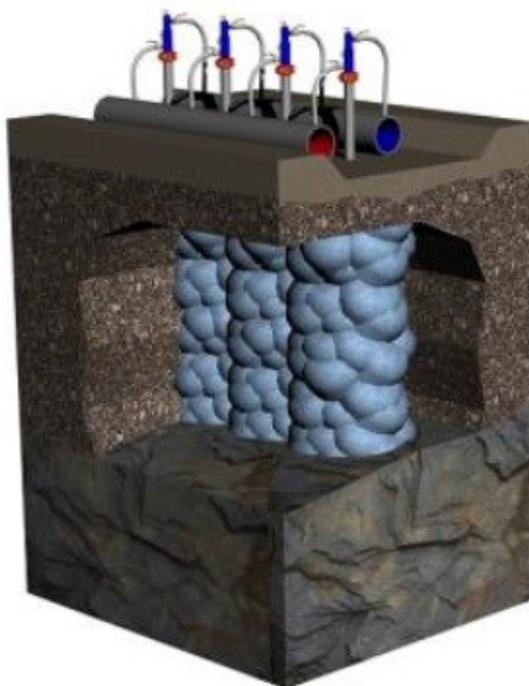
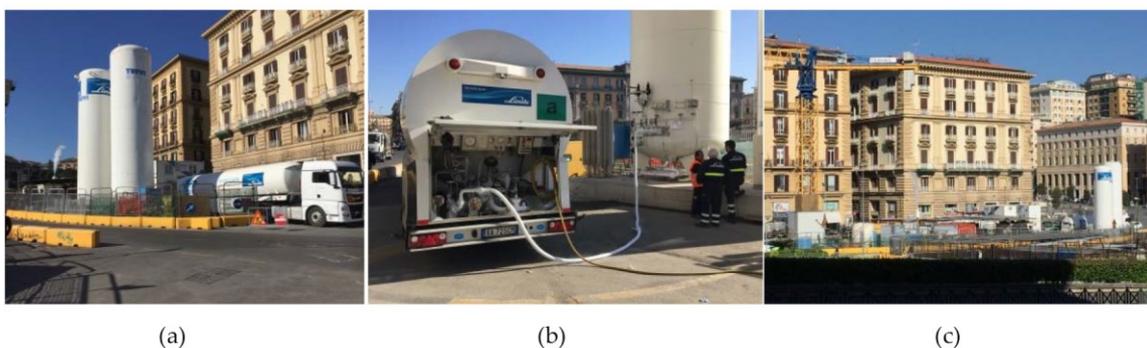


Рисунок 2.6 – Формування замороженої зони (штучна стінка) [95]

Проведення лабораторних досліджень в даному напрямку потребує дорогого обладнання (рис. 2.7, 2.8) та кваліфікованих кадрів.



(a)

(b)

(c)

Рисунок 2.7 – Обладнання для заморожування підземних вод:

a – автотранспорт для перевезення рідкого азоту; *b* – завантаження рідкого азоту з автотранспорту в спеціальну цистерну; *c* – загальний вигляд промислового майданчика [82]

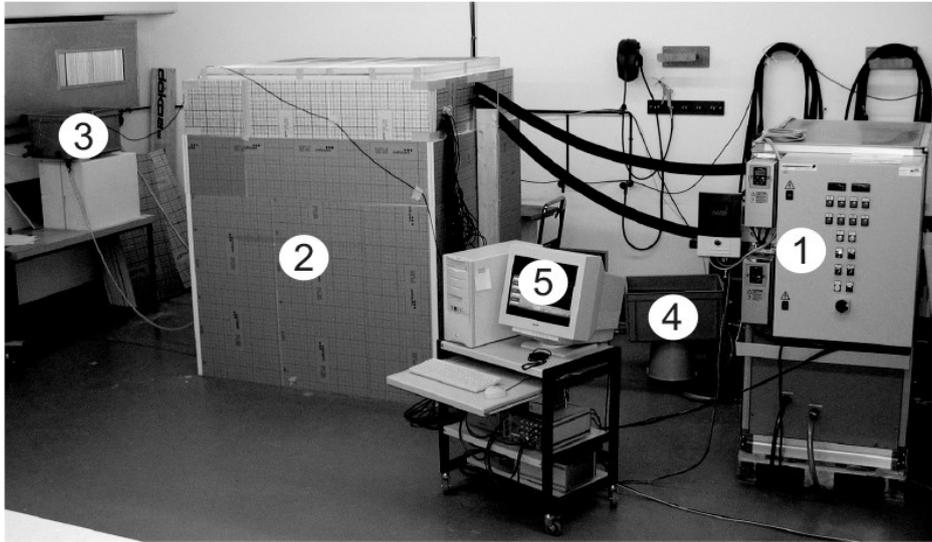


Рисунок 2.8 – Лабораторне обладнання для проведення досліджень по заморожуванню підземних вод: 1 – охолоджувальна машина, 2 – коробка з теплоізоляцією; 3, 4 – резервуари для води; 5 – система реєстрації даних [87]

Для теоретичного розв'язання цієї прикладної задачі потрібно мати відповідну математичну модель. Розглянемо виведення рівняння енергії, що буде моделюючим рівнянням для рішення цієї задачі в даній роботі.

Виділимо в потоці підземних вод контрольний елемент у вигляді прямокутника (двовимірна задача, рис. 2.9), що має розміри dx , dy .

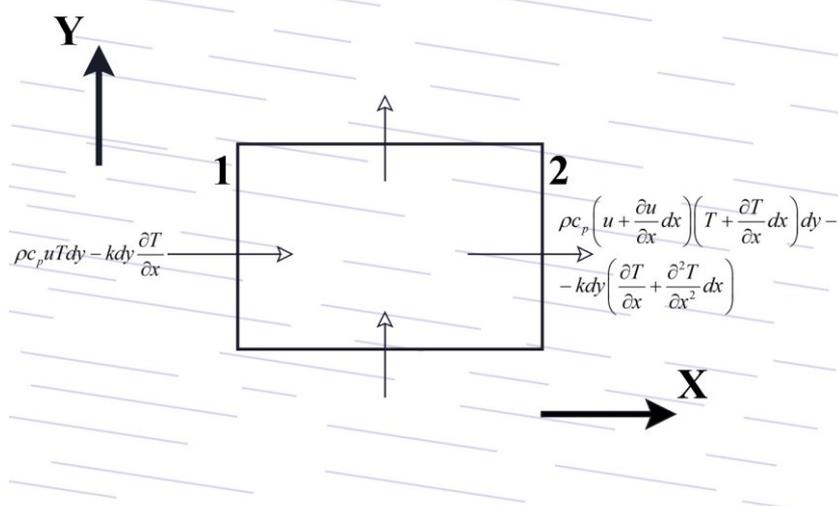


Рисунок 2.9 – Розрахункова схема

Для отримання рівняння енергії потрібно записати баланс енергії для виділеного контрольного елемента. Теплотою фазового перетворення на межі формування льоду будемо нехтувати.

Враховуємо, що зміна внутрішньої енергії в контрольному елементі дорівнює:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = mc_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.15)$$

де m – маса рідини в контрольному елементі; c_p – питома теплоємність; T – температура; t – час. Маса рідини визначається так:

$$m = \rho W,$$

де ρ – густина рідини; W – об'єм рідини в контрольному елементі.

Зміна внутрішньої енергії в контрольному елементі відбувається за рахунок потоків енергії через грані контрольного елемента в напрямку вісі X та вісі Y . Тобто, формалізовано, це можна записати так:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = q_{1x} + q_{2x} + q_{3y} + q_{4y},$$

де $q_{1x}, q_{2x}, q_{3y}, q_{4y}$ – потік енергії в напрямку вісі X та вісі Y .

Потік через грань 1 в напрямку вісі X можна записати так (рис. 2.9):

$$q_{1x} = \rho c_p u T dy - k dy \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Потік через грань 2 контрольного елемента в напрямку вісі X можна записати так (рис.2.9):

$$q_{2x} = \rho c_p \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) dy - k dy \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \right).$$

Аналогічно можна записати потоки енергії за рахунок конвекції та теплопровідності у вертикальному напрямку (вісь Y). Враховуючи це, після елементарних перетворень (нехтуючи величинами другого порядку малості та використовуючи рівняння нерозривності), баланс енергії для виділеного контрольного елемента має вигляд:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_v \frac{\partial uT}{\partial x} + \rho c_v \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2.16)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності.

Рівняння (2.16) можна записати в іншому вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2.17)$$

де $a = \frac{k}{\rho c_p}$ – коефіцієнт температуропровідності.

Рівняння енергії з урахуванням залежності коефіцієнта температуропровідності від напрямку має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.18)$$

де $a_x = \frac{k_x}{\rho c_p}$, $a_y = \frac{k_y}{\rho c_p}$ – коефіцієнти температуропровідності в напрямку вісі X та

вісі Y .

Рівняння (2.16)-(2.18) є математичним записом фундаментального закону механіки суцільного середовищ – закону збереження енергії.

Для рівняння енергії реалізуються такі крайові умови:

1. При $t=0$ задається температура рідини в області дослідження.

2. На границі входження потоку в область дослідження задається умова $T=T_1$, де T_1 – відома температура підземного потоку.

3. На границі виходу потоку з області дослідження задається $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$, тобто, на границі виходу потоку нехтуємо зміною температури за рахунок теплопровідності.

4. На твердих границях $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$, де n – одиничний вектор нормалі до границі.

У місці розташування заморожуючого елемента задається його температура, що підтримується постійною (гранична умова першого роду). В

контрольних елементах, де сформувався лід, підтримується постійна температура) 0°C . Теплою фазового переходу будемо нехтувати.

Перевагами розглянутої математичної моделі є:

1. Модель має універсальний характер, тобто, не «прив'язана» до конкретної рідини.

2. Модель виражає фундаментальний закон механіки суцільного середовища – закон збереження енергії, що дає можливість використовувати модель як для нестационарних, так і стаціонарних процесів теплопереносу.

3. Модель є коректною як для стаціонарного, так і нестационарного руху рідини.

4. Модель дає можливість аналізувати динаміку процесу теплопереносу при різних значеннях коефіцієнтів, що визначають інтенсивність процесу теплопровідності.

5. Модель дає можливість здійснювати прогнозування динаміки формування льоду в підземному потоці при різних режимах охолодження.

Недоліками розглянутої математичної моделі є:

1. Неможливість отримання аналітичного рішення для реальних умов та умов нестационарного охолодження підземного потоку.

2. Для рішення моделюючого рівняння потрібно використовувати чисельні методи.

Вибір математичної моделі у вигляді (2.17)-(2.18) залежить від:

- 1) наявність коректної вхідної гідрологічної інформації;
- 2) мета математичного моделювання;
- 3) час, що виділяється на проведення теоретичних досліджень;
- 4) кваліфікаційний рівень розробника моделі.

Відзначимо, що при чисельному розв'язанні рівняння енергії в задачах штучного заморожування підземних вод буде використовуватися метод «наскрізного розрахунку».

2.5 Визначення критичної швидкості суфозії

При роботі дренажних систем швидкість руху підземного потоку збільшується. Таке збільшення швидкості потоку може привести до появи дуже негативного явища – суфозії. При перевищенні швидкості потоку певного значення $v_{кр}$ (критична швидкість суфозії) починається винесення часток ґрунту, що, в свою чергу, створює загрозу стійкості споруд. Таким чином, при організації технічних заходів, що спрямовані на зниження рівня ґрунтових вод, важливо заздалегідь визначати такий режим роботи дренажної системи, щоб швидкість потоку не досягала значення $v_{кр}$. На стадії проектування дренажної системи потрібно заздалегідь «передбачити» зони, де можлива поява суфозії, щоб уникнути появи негативних наслідків (просідання ґрунту, руйнування будівель).

Для розрахунку критичної швидкості суфозії можна використовувати наступну емпіричну залежність [41]:

$$v_{кр} = \varphi_0 d_{\max}^c \sqrt{\frac{n \cdot g}{\nu}} k, \text{ см/с} \quad (2.16)$$

де d_{\max}^c – максимальний діаметр суфозійних часток; n – ефективна порозність ґрунту; $g=9.81$ м/с²; k – коефіцієнт фільтрації; φ_0 – коефіцієнт критичної швидкості.

Коефіцієнт критичної швидкості визначається наступним чином:

$$\varphi_0 = 0.6 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_b} - 1 \right) \cdot f'' \sin \left(30^\circ + \frac{\theta}{8} \right),$$

де ρ_g – щільність ґрунту; ρ_b – густина води; f'' – приведений коефіцієнт тертя; θ – кут між напрямом швидкості фільтрації та зсувною силою; η – коефіцієнт неоднорідності ґрунту.

Параметр f'' визначається так:

$$f'' = 0.82 - 1.8n + 0.0062(\eta - 5),$$

де η – коефіцієнт неоднорідності ґрунту.

Слід зазначити, що при проведенні дослідницьких робіт не завжди відомим є значення параметрів, що дозволяють розрахувати $v_{кр}$ на базі розглянутої залежності. Це пов'язано з тим, що для використання даної залежності потрібно провести значну кількість лабораторних досліджень, що потребує часу. Тому, при «пілотних» розрахунках, можна використовувати існуючі літературні дані для отримання прогнозних даних.

Інша відома емпірична залежність для визначення критичної швидкості суфозії має вигляд:

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot d_{\max}}{k_f (1 - \varepsilon)}}, \text{ см/с}$$

де d_{\max} – максимальний діаметр суфозійних часток; k_f – коефіцієнт форми часток; ε – ефективна пористість.

Таким чином, при моделюванні процесу зниження рівня ґрунтових вод при роботі дренажної системи потрібно визначати локальне значення швидкості підземного потоку в області дослідження та порівнювати це значення з критичною швидкістю суфозії. Ця задача вирішується за наступним алгоритмом:

1. В області, де планується використання дренажу, визначається зона розташування дренажу та його параметри.
2. Здійснюється розв'язання задачі фільтрації на базі тієї чи іншої моделі руху підземних вод (наприклад, модель руху безнапірного потоку).
3. На базі рівняння Дарсі визначається поле швидкості потоку підземних вод при роботі дренажу.
4. Розраховується значення критичної швидкості суфозії $v_{кр}$.
5. Здійснюється порівняння швидкості потоку підземних вод з критичною швидкістю суфозії $v_{кр}$.
6. Визначаються зони, де є ризик появи суфозії при роботі дренажу.
7. Якщо локальна швидкість буде мати «небезпечне» значення, тобто ця швидкість буде дорівнювати значенню $v_{кр}$, то потрібно змінити режим водозниження.

Безумовно, дотримання такого регламенту є необхідним ще на етапі розробки заходів по зниженню рівня ґрунтових вод на підтопленій території.

В робот здійснено програмну реалізацію розглянутих математичних моделей визначення критичної швидкості для оцінювання ризику появи суфозії. Це підпрограма «SUF», що інкорпорована в комплекс програм розрахунку поля глибин потоку ґрунтових вод при роботі дренажної системи.

Слід відзначити, що при проведенні «пілотних» розрахунків, за відсутності достовірної інформації по гідрогеологічним параметрам зони дослідження (приведений коефіцієнт тертя, коефіцієнт неоднорідності ґрунту тощо), то значення $v_{кр}$ можна приймати з літературних джерел.

2.6 Модель транспорту домішки в підземному потоці

Особливістю підземних вод на багатьох підтоплених територіях є те, що вони містять значну кількість домішок (кислоти, сульфати, хлориди, радіоактивні забруднення, бактеріальні забруднення тощо). Такі забруднені підземні води формуються в селітебних зонах при фільтрації забруднених стічних вод зі ставків-накопичувачів шахтних вод (наприклад, Павлоградський район Дніпропетровської області) та інфільтрації стоків з поверхні промислових майданчиків в ґрунтові води (промислові райони м. Дніпро). Таким чином, при аналізі ефективності роботи дренажних систем, що вирішують задачу по зниженню рівня ґрунтових вод, потрібно також здійснювати аналіз рівня забруднення ґрунтових вод при роботі дренажу. Розв'язання цієї задачі є необхідним для:

1. Прогнозування розмірів та інтенсивності зони забруднення підземних вод після зупинки роботи дренажних систем.
2. Розробки заходів по очищенню підземних вод, що потрапили в дренажну систему.

Слід відзначити, що розв'язання задачі геоміграції домішки в підземних водах є дуже складним, оскільки вимагає врахування значної кількості факторів, що впливають на цей процес [13, 14, 24, 38, 49, 62, 73, 78, 82, 84, 88, 91, 95, 104].

Для опису руху домішки в підземних водах використовується наступне рівняння:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \quad (2.17)$$

де u, v – компоненти вектора швидкості потоку ґрунтових вод; C – усереднена по глибині потоку концентрація домішки; Q – інтенсивність емісії домішки в підземний потік; μ_x, μ_y – коефіцієнти дисперсії; σ – коефіцієнт сорбції; $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)$ – дельта-функція Дірака; x_i, y_i – координати джерела емісії домішки в підземний потік; t – час.

Для рівняння міграції домішки в безнапірному потоці ґрунтових вод реалізуються такі крайові умови:

1. При $t=0$ задається концентрація домішки в області дослідження. Якщо розглядається рух «плями» агресивної домішки, то задається початкова форма плями, концентрація домішки в ній.

2. На границі, де потік входить в область дослідження, задається умова $C=C_1$, де C_1 – відома концентрація домішки.

3. На границі, де потік виходить з області дослідження, задається $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$, тобто, на границі виходу потоку нехтуємо переносом домішки за рахунок дифузії.

4. На твердих границях $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$, де n – одиничний вектор нормалі до границі.

Перевагами розглянутої математичної моделі переносу домішки в потоці підземних вод є:

1. Модель має універсальний характер, тобто не «прив'язана» до конкретного безнапірного потоку ґрунтових вод в конкретному регіоні та базується на використанні фундаментального закону механіки – закону збереження маси.

2. Модель є коректною як для стаціонарного, так і нестаціонарного процесу емісії домішки.

3. Модель дає можливість аналізувати процес забруднення підземних вод у випадку хімічного, радіоактивного, бактеріологічного забруднення.

5. Модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на формування областей забруднення в підземному потоці.

Недоліком розглянутої математичної моделі є:

1. Неможливість отримання аналітичного розв'язку для реальних умов, в тому числі при нерівномірному русі підземних вод.

2. Для розв'язання моделюючого рівняння потрібно використовувати чисельні методи.

Слід відзначити, що дана модель використовується для розв'язання задачі нейтралізації агресивної домішки у підземних водах при використанні проникного бар'єру.

2.7 Модель масопереносу у ґрунтових водах при використанні проникного бар'єру

Стічні води, що потрапляють у підземний потік зі сховищ (ставки-відстійники), або при витоках на території підприємств, можуть бути агресивними та з часом впливати на стійкість фундаменту споруд, підземні комунікації тощо. Таким чином, при підтопленні території хімічно забруднені ґрунтові води взаємодіють з фундаментами будівель. Інтенсивне забруднення ґрунтових вод також має місце при інфільтрації різного роду домішок в ґрунтові води від промислових майданчиків або при аварійних витоках на транспорті, підприємствах. Паралельно з задачею зниження рівня ґрунтових вод виникає задача по захисту ґрунтових вод від хімічного забруднення. Для розв'язання даної задачі можуть використовуватись різні підходи. В даній роботі пропонується використання спеціального фільтрувального елемента в потоці ґрунтових вод (проникний бар'єр). Наприклад, на рис. 2.10 показано фільтрувальний елемент, в якому розташовано нейтралізуюче завантаження. Такий бар'єр називається «*permeable reactive barrier*» [73, 103]. Крізь даний

фільтрувальний елемент рухається потік забрудненої води, всередині самого елемента відбувається процес нейтралізації домішки.

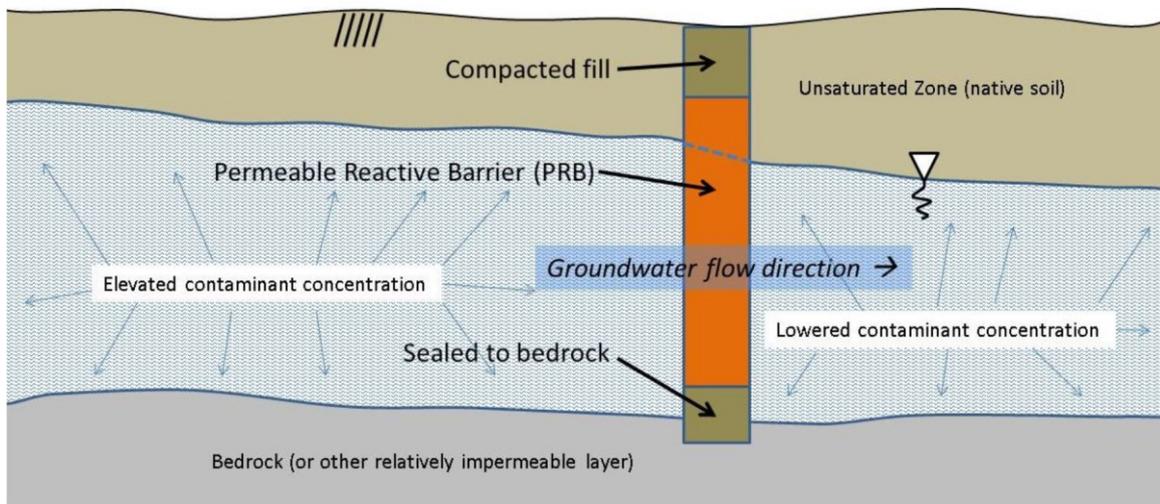


Рисунок 2.10 – Схема проникного бар'єра [79]

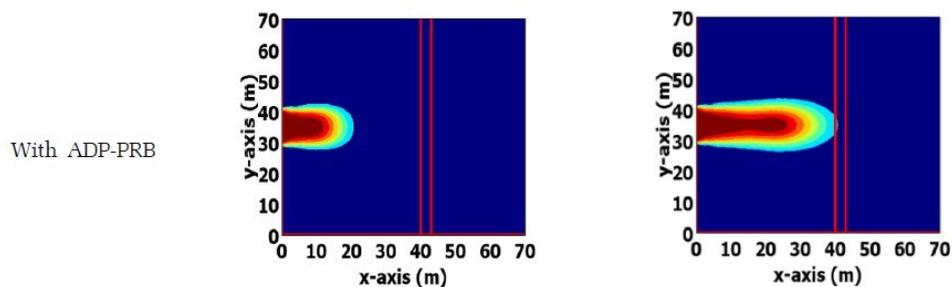


Рисунок 2.11 – Область забруднення підземних вод (проникний бар'єр), моделювання за допомогою коду COMSOL [104]

Особливістю даної зони є те, що вона не перешкоджає руху підземного потоку. Тобто, це може бути сітка в потоці, крізь прозори якої рухається забруднена підземна вода. В цій сітці розташовані касети з нейтралізатором, який вступає в реакцію з забрудненням. В якості нейтралізатора у проникному бар'єрі може виступати ZVI (zerovalent iron – нуль валентний йон, що виступає як відновник, передаючи електрони забруднювачам і перетворюючи їх на менш шкідливі форми) для видалення хлорованих розчинників, активоване вугілля для видалення органічних домішок, цеоліти для видалення важких металів, CaCO_3 (вапняк) для видалення важких металів та кислот.

Нижче розглянуто дві математичні моделі для визначення ефективності роботи проникного бар'єру. Перша модель – для розв'язання задачі гідродинаміки, масопереносу та аналізу ефективності процесу нейтралізації домішки в ґрунтових водах (планова задача), де розташовані касети («*permeable reactive barrier*»). В цій моделі використовується наступна система рівнянь механіки суцільного середовища:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right), \quad (2.18)$$

$$u = -k \frac{\partial H}{\partial x}, v = -k \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (2.19)$$

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (2.20)$$

$$\text{«кислота} + \text{нейтралізатор} = \text{продукти реакції}\text{»}, \quad (2.21)$$

де C – концентрація агресивної домішки в потоці ґрунтових вод; h – рівень ґрунтових вод. Пояснення для інших параметрів рівнянь системи та постановка крайових умов для моделюючих рівнянь наведено вище.

Друга модель – для розв'язання профільної задачі, в якій замість рівняння фільтрації (2.18) використовується модель потенціального руху. Моделююче рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (2.22)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (2.23)$$

До рівнянь даної системи додається також рівняння кінетики, що має вигляд (2.21).

Для рівняння (2.22) ставляться такі граничні умови:

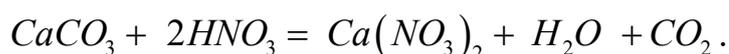
1. $\frac{\partial P}{\partial x} = V_{in}$ – на вхідній границі (V_{in} – відома швидкість потоку повітря на цій границі).
2. $P + \text{Const}$ – на границі виходу.

3. $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, де n – зовнішня нормаль до твердої поверхні.

Крайові умови для рівняння руху агресивної домішки розглянуто вище (рівняння масопереносу). В зоні розташування фільтрувального бар'єру (проникний бар'єр) задається концентрація нейтралізатора.

Слід підкреслити дуже важливий аспект – для розв'язання планової задачі на базі рівняння фільтрації (2.18) потрібно забезпечити модель рядом вхідних параметрів, визначення яких для конкретної ділянки потребує певного часу, що пов'язано зі збором даних зі спостережних свердловин. Тому, для «пілотних» розрахунків, при недостатній кількості надійних початкових даних для моделі (2.18), можна використовувати модель (2.22).

Таким чином, для моделювання процесу локальної нейтралізації підземних вод за допомогою спеціальних фільтрувальних бар'єрів, використовується рівняння фільтрації (2.18) або рівняння для потенціалу швидкості, рівняння масопереносу (2.20) та рівняння реакції (2.21). Конкретний вигляд рівняння реакції залежить від нейтралізатора та домішки. Наприклад, якщо використовується $CaCO_3$ (для нейтралізації), що розташоване в фільтрувальному елементі, а ґрунтові води містять азотну кислоту, то рівняння реакції (2.21) має вигляд:



Алгоритм розв'язання задачі такий:

1. Формується вигляд розрахункової області (визначаються розміри розрахункової області, положення свердловин, положення фільтрувального елемента тощо).

2. Задаються параметри для моделюючих рівнянь (порозність, коефіцієнт фільтрації тощо).

3. Виконується розв'язок рівняння фільтрації (2.18) або рівняння для потенціалу швидкості.

4. Розраховується поле швидкості потоку ґрунтових вод на базі закону Дарсі (2.19).

5. Виконується розв'язок рівняння масопереносу (2.20) та визначається концентрація агресивної домішки в області дослідження (включаючи область, де розташовані касети з нейтралізатором) на момент часу t^n .

6. Виконується розрахунок процесу нейтралізації згідно з рівнянням кінетики (2.21) та визначається концентрація домішки в області дослідження після проходження реакції «кислота + нейтралізатор» на момент часу t^n .

7. Повторюється розрахунок для нового часового кроку t^{n+1} , починаючи з п.5.

2.8 Параметри, що необхідні для практичної реалізації моделі геоміграції

Для проведення прогнозних розрахунків на базі рівняння геоміграції потрібно задати значення коефіцієнтів n , μ_x , μ_y . Ці параметри визначаються експериментальним шляхом.

Орієнтовні значення коефіцієнта n такі [14]:

- $n=0,01 \div 0,05$ – суглинок, глина;

- $n=0,1$ – дрібнозернисті піски, супісок;

- $n=0,001 \div 0,03$ – тріщинуваті скельні і напівскельні незакарстовані породи.

Визначення коефіцієнтів дисперсії являє собою реальну гідродинамічну проблему. В цілому, коефіцієнт дисперсії визначається на базі залежностей [14]:

$$\mu_x = \mu_m + \mu_{xx} \text{ (поздовжній коефіцієнт дисперсії),}$$

$$\mu_y = \mu_m + \mu_{yy} \text{ (поперечний коефіцієнт дисперсії),}$$

де μ_m – молекулярний коефіцієнт дифузії; μ_{xx}, μ_{yy} – коефіцієнти гідродинамічної дисперсії.

Так як молекулярний коефіцієнт дифузії значно менший, ніж гідродинамічний, то при проведенні розрахунків величиною μ_m нехтують.

Для визначення коефіцієнтів гідродинамічної дисперсії існують такі залежності [104]:

$$\mu_{xx} = \alpha_L u + \tau \mu_m,$$

$$\mu_{yy} = \alpha_T v + \tau \mu_m,$$

де α_L, α_T – поздовжній та поперечний параметр дисперсії; τ – коефіцієнт звивистості.

Параметр τ визначається так:

$$\tau = n^{m-1},$$

де $m=1,8 \div 2$ [64].

При проведенні теоретичних досліджень часто приймається $m=2$.

Параметр α_L визначається наступним чином [77]:

$$\alpha_L = 0.83(\log L)^{2.414},$$

де L – характерна довжина.

При проведенні розрахунків в ряді випадків розглядають значення лише параметра α_L

Орієнтовні значення коефіцієнта гідродинамічної дисперсії такі [14]:

- у суглинках $0,02 \div 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$;
- у супісках $1 \div 6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$;
- у пісках $2 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$.

Слід відзначити, що дані значення коефіцієнта гідродинамічної дисперсії були визначені лабораторним шляхом для певного діапазону швидкості потоку.

Таким чином, якщо не враховувати молекулярну дифузію, то розрахункова формула для визначення коефіцієнту гідродинамічної дисперсії зводиться до такого вигляду:

$$\mu_x = \alpha_L u, \quad \mu_y = \alpha_T v.$$

З цих залежностей можна бачити, що коефіцієнти гідродинамічної дисперсії залежать від кінематичних характеристик потоку та від типу ґрунту (розмір часток та неоднорідність середовища).

Стосовно параметрів моделі геоміграції потрібно підкреслити наступне:

1. Надійним методом визначення параметрів є фізичний (лабораторний) експеримент.

2. Проведення фізичного експерименту потребує значного часу, результати експерименту «придатні» лише для тих ділянок водоносного горизонту, з яких були взяті проби для лабораторних досліджень.

3. При проведенні, наприклад, «пілотних» розрахунків приймають значення необхідних параметрів з відомих літературних джерел.

Необхідними початковими умовами для проведення обчислювальних експериментів є наступні:

1. Поле глибин підземного потоку в області дослідження.

2. Поле температури в області дослідження перед початком роботи устаткування.

3. Концентрація домішки в підземних водах перед початком роботи дренажних систем.

4. Коефіцієнт дисперсії: при проведенні «пілотних» розрахунків даний коефіцієнт можна визначати за формулою

$$\mu = \delta_1 \cdot V,$$

де δ_1 – коефіцієнт, що залежить від типу ґрунту та напрямку потоку (параметр розсіювання); V – локальна швидкість потоку.

5. Коефіцієнт фільтрації водоносного шару.

6. Об'ємна порозність ε , ступінь насиченості η .

7. Нестача насичення μ .

Перераховані вхідні дані відносяться до типових гідрологічних параметрів.

Висновки до розділу 2

1. В розділі розглянуто математичні моделі для розв'язання складних, багатofакторних задач по оцінці ефективності використання систем для зниження рівня ґрунтових вод на підтоплених територіях.

2. Запропоновано математичні моделі для комплексного розв'язання задачі «дренаж підземних вод + робота проникного бар'єру». Розглянуті математичні моделі базуються на фундаментальних законах механіки суцільного середовища, що забезпечує універсальність запропонованих моделей.

3. Запропоновано математичні моделі для комплексного розв'язання задачі «динаміка підземних вод + робота устаткування по заморожуванню підземного потоку». Даний клас задач є підготовчим етапом перед використанням дренажу підземних вод на окремій ділянці. Розглянуті математичні моделі базуються на фундаментальних законах механіки суцільного середовища – законі збереження маси та законі збереження енергії.

4. Практична реалізація розглянутих математичних моделей здійснюється на базі стандартної гідрогеологічної інформації.

5. Розглянуті математичні моделі можливо розв'язати лише чисельно. Тому дуже важливою є розробка ефективних чисельних моделей для практичної реалізації багатофакторних моделей динаміки підземних вод та тепломасопереносу.

6. Для практики вкрай важливо, щоб, з одного боку, чисельні моделі були стійкими при проведенні розрахунків в областях складної геометричної форми та при нерівномірному русі підземного потоку, а з іншого боку, потребували незначних витрат часу при розрахунку на комп'ютерах малої та середньої потужності.

7. Для аналізу динаміки підземних вод запропоновано використання двох моделей гідродинаміки в залежності від наявності початкових даних. При недостатній кількості надійних початкових даних запропоновано використовувати модель потенціального руху. При достатній кількості початкових даних пропонується використовувати планову модель фільтрації ґрунтових вод.

8. Розглянуті математичні моделі відносяться до класу «operational models», тобто моделей, що дозволяють проводити наукове дослідження багатофакторних процесів динаміки ґрунтових вод та тепломасопереносу з метою обґрунтування інженерних рішень, що приймаються.

РОЗДІЛ 3 ЧИСЕЛЬНІ МОДЕЛІ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ

В даному розділі розглядається побудова чисельних моделей для комплексного рішення задач динаміки підземних вод та тепломасопереносу в ґрунтових водах. Наводиться опис структури побудови чисельних моделей, базуючись на сучасних поняттях «чисельна модель = диференціальне рівняння + чисельний метод розв'язку + програма розрахунку на персональному комп'ютері»

3.1 Чисельна модель гідродинаміки

Процес руху підземних вод, при нестачі вхідних гідрологічних даних, може бути описаний наступним рівнянням (рівняння Лапласа для потенціалу швидкості P):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (3.1)$$

Для чисельного розв'язання даного диференціального рівняння використовується прямокутна різницева сітка. Потенціал швидкості визначається в центрах різницевих комірок (контрольних елементів). Компоненти вектора швидкості підземного потоку визначаються на сторонах різницевих комірок: компонента u визначається на вертикальних сторонах різницевих комірок, компонента v – на горизонтальних сторонах комірок.

Для чисельного розв'язання рівняння Лапласа будемо використовувати дві чисельні схеми. Перша схема – один з найбільш ефективних методів розв'язання задач математичної фізики – метод розщеплення. Для цього запишемо рівняння (3.1) в «еволюційному вигляді» наступним чином:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \quad (3.2)$$

де t – фіктивний час.

Виконавши апроксимацію похідних в рівнянні (3.2) та здійснивши його розщеплення за часом, отримано наступну схему (схема А. А. Самарського):

- перший крок:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right]; \quad (3.3)$$

- другий крок:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (3.4)$$

Таким чином, для визначення поля функції P (потенціал швидкості) потрібно в кожній різницевій комірці (контрольному елементі) послідовно вирішувати рівняння (3.3) та (3.4). Процедура цього рішення закінчується, коли виконується умова:

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

де ε – мале число (приймається, $\varepsilon = 0,001$); n – номер ітерації.

Перевагами розглянутої кінцево-різницевої схеми є:

1. Схема є неявною, але визначення невідомого значення потенціалу швидкості в центрах контрольних елементів здійснюється за явною формулою. Це дозволяє побудувати простий алгоритм розрахунку поля потенціалу швидкості в областях зі складною геометрією.

2. Схема є абсолютно стійкою (А. А. Самарський), тобто не існує обмеження на крок по часу.

3. Схема допускає просту програмну реалізацію.

В якості другої різницевої схеми використовується метод Лібмана. Для використання цього методу здійснюється наступна апроксимація похідних з рівняння (3.1):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2},$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2}.$$

Далі, представлено рівняння Лапласа в кінцево-різницевому вигляді:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0. \quad (3.5)$$

З цього рівняння можна записати явну формулу для визначення шуканої величини $P_{i,j}$ в середині кожної різницевої комірки:

$$P_{i,j} = \frac{1}{Z} \left[\frac{P_{i+1,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right], \quad (3.6)$$

де $Z = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right)$.

Таким чином, невідоме значення $P_{i,j}$ визначається за явною формулою.

Відзначимо переваги розглянутої кінцево-різницевої схеми:

1. Визначення поля потенціалу здійснюється за явною формулою.
2. Простота розрахункової залежності для потенціалу швидкості дозволяє побудувати простий алгоритм визначення шуканої функції в областях зі складною геометрією.

Використання обох кінцево-різницевих схем дає можливість «внутрішнього» контролю за розрахунком поля потенціалу.

Якщо поле потенціалу швидкості визначено, то здійснюється розрахунок поздовжньої та поперечної компонент вектора швидкості потоку води наступним чином:

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

Як зазначено раніше, компоненти вектора швидкості потоку води визначаються на гранях різницевих комірок (контрольних елементів). Це дає можливість створити консервативну різницеву схему для рівняння теплопереносу або масопереносу.

Здійснено програмну реалізацію побудованих чисельних моделей (код SLER1). До цього коду входять підпрограми типу SUBROUTINE:

➤ *SLEP* – розрахунок потенціалу швидкості на базі неявної схеми розщеплення (схема А. А. Самарського);

- *SLE* – реалізація граничних умов при розрахунку за неявної схемою розщеплення;
- *SLELI* – розрахунок потенціалу швидкості на базі методу Лібмана;
- *SLELO* – реалізація граничних умов при розрахунку за методом Лібмана;
- *SEL* – розрахунок поля швидкості на базі поля потенціалу, що розрахований за методом А. А. Самарського;
- *SL* – розрахунок поля швидкості на базі поля потенціалу, що розрахований за методом Лібмана;
- *SLPR* – друк результатів моделювання.

Час розрахунку на базі даної чисельної моделі близько 2 с.

Дані для проведення обчислювального експерименту формуються в окремому файлі SLED.dat. Цей файл дає наступну інформацію:

- геометрична форма розрахункової області;
- розміри розрахункової області;
- швидкість підземного потоку на вході в розрахункову область;
- крок за часом;
- кількість ітерацій
- розмір різницевої сітки.
- значення потенціалу швидкості на виході з розрахункової області.

3.2 Чисельна модель динаміки ґрунтових вод

Процес руху підземних вод може бути описаний наступним рівнянням:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right) \pm W \quad (3.7)$$

де h – глибина підземного потоку; k – коефіцієнт фільтрації; μ – нестача насичення (водовіддача); « $+W$ » – інтенсивність інфільтрації; « $-W$ » – інтенсивність відкачки води з водоносного шару; h_m – середня глибина підземного потоку.

Слід відзначити, що для моделювання роботи дренажної свердловини є два

підходи:

1. Задавати в контрольному елементі значення параметру W .
2. Задавати в контрольному елементі значення глибини підземного

потoku.

В дані роботі використовується другий підхід.

При використанні моделюючого рівняння (3.7) водотрив вважається горизонтальним.

Компоненти вектора швидкості підземного потоку визначаються на базі закону Дарсі:

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, v = -k \frac{\partial h}{\partial y}. \quad (3.8)$$

Граничні умови для рівняння (3.7) розглянуто в Розділі 2.

Для чисельного вирішення моделюючого рівняння (3.7) здійснюється його розщеплення наступним чином:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \left(\frac{\partial h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial h^2}{\partial y^2} \right), \quad (3.9)$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = W. \quad (3.10)$$

Для чисельного вирішення рівняння (3.10) застосовується метод Ейлера.

Вид розрахункового рівняння є наступним:

$$h^{n+1} = h^n + \frac{\Delta t}{\mu} W. \quad (3.11)$$

Для чисельного розв'язання рівняння (3.9) застосовується прямокутна різницева сітка. Двокрокова схема розщеплення (метод сумарної апроксимації) має вигляд:

- перший крок:

$$\frac{h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[a \frac{-h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[a \frac{-h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + h_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right]; \quad (3.12)$$

- другий крок:

$$\frac{h_{i,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[a \frac{h_{i+1,j}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[a \frac{h_{i,j+1}^{n+1} - h_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right], \quad (3.13)$$

де $a = \frac{kh_m}{\mu}$.

Компоненти вектора швидкості підземного потоку розраховуються на базі таких залежностей:

$$u_{ij} = -k \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = -k \frac{h_{i,j} - h_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (3.14)$$

Компоненти вектора швидкості підземного потоку визначаються на бічних сторонах різницевих комірок (контрольних елементів). Це дає можливість побудувати чисельні моделі тепломасопереносу, що мають важливу рису – вони є консервативними, тобто, для кожного контрольного елемента (різничевої комірки) виконується закон збереження маси (енергії, якщо розглядається задача теплопереносу).

Слід відзначити наступний важливий аспект розробленої чисельної моделі – це формування вигляду розрахункової області. Таке формування здійснюється за допомогою методу маркування (porosity technique). Приклад такого формування розрахункової області показано на рис. 3.1.

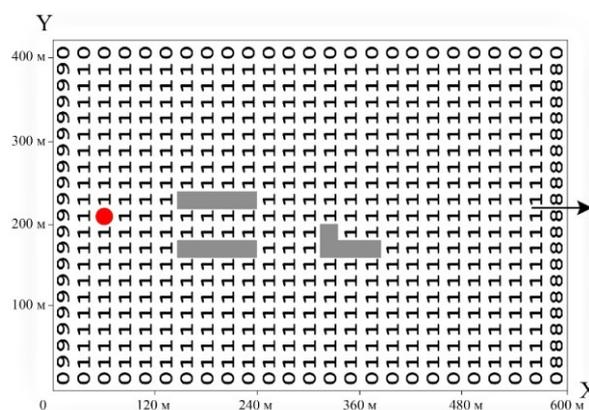


Рисунок 3.1 – Схема розрахункової області в задачі про роботу дренажної свердловини на підтопленій території (метод маркування): червоний маркер – дренажна свердловина; маркер «1» – область руху підземних вод; «сіра» зона – положення фундаментів будинків

Але зрозуміло, що при роботі дренажу рівень ґрунтових вод біля будинків (фундаментів) буде падати (рис. 3.2).

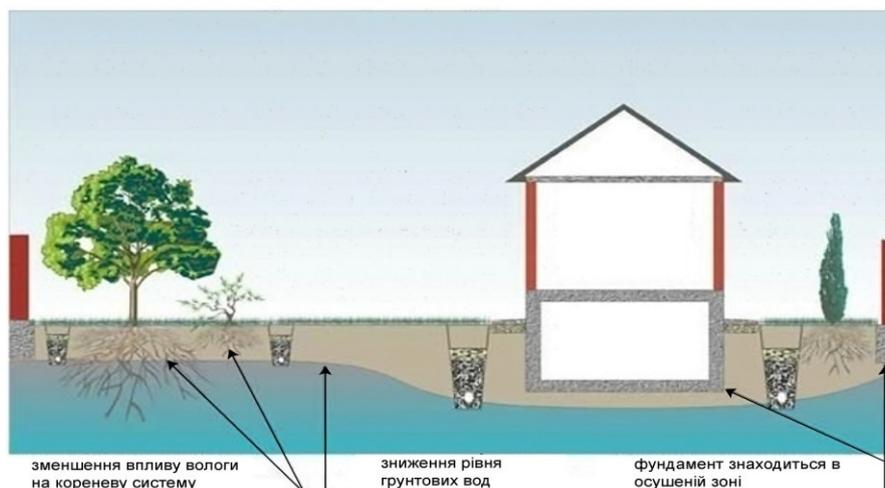


Рисунок 3.2 – Зміна рівня ґрунтових вод біля фундаменту при роботі дренажу

Таким чином, настане час, коли фундаменти вже не будуть «у контакті» з потоком ґрунтових вод. Тому дуже важливо врахувати цей аспект при проведенні моделювання. В роботі розроблено метод розрахунку рівня ґрунтових вод при роботі дренажу в умовах підтоплення фундаментів будинків, тобто при врахуванні впливу фундаментів, як перешкод, на гідродинаміку підземного потоку. Принцип цього методу полягає в тому, що рішення рівняння фільтрації (3.9) за допомогою різницевої залежностей (3.12), (3.13) послідовно здійснюється для розрахункових областей двох типів:

1. Розрахункова область першого типу: в області вказано місце розташування фундаментів споруд (відома їх форма, розміри) та враховується, що вони є «перешкодами на шляху руху підземних вод»; тобто при чисельному інтегруванні рівняння фільтрації враховується, що фундаменти – це зона, де має місце обтікання ґрунтовим потоком перешкоди (фундаменту) (рис.2.1).

2. Розрахункова область другого типу: в області вже відсутній вплив фундаментів споруд на гідродинаміку підземного потоку; тобто при чисельному інтегруванні рівняння фільтрації вже не враховується вплив фундаменту, як перешкоди, на гідродинаміку потоку (рис.3.2).

Перехід від розрахункової області першого типу до розрахункової області другого типу здійснюється, коли рівень ґрунтових вод біля будинку падає до певної величини H . Величина H задається користувачем та відповідає рівню ґрунтових вод, коли вони не досягають цього фундаменту.

Тобто, при проведенні обчислювального експерименту відбувається перехід від одного вигляду розрахункової області (наявність перешкод в потоці ґрунтових вод) до другого вигляду (відсутність перешкод в потоці ґрунтових вод) на певному часовому кроці роботи дренажної системи. Як вже зазначалось, ця умова переходу має вигляд:

$$h_s = H ,$$

де h_s – значення глибини ґрунтових вод в контрольному елементі, що примикає до сторони фундаменту (на рис. 3.1 – це маркери «1» біля кожної сторони «сірої» зони, тобто фундаменту).

Створено комп'ютерну програму для чисельного інтегрування рівняння (3.9), мова програмування FORTRAN, в який використовується розроблений метод переходу від розрахункової області першого типу до розрахункової області другого типу. Програма побудована на модульному принципі, основними підпрограмами типу SUBROUTINE є наступні:

1. *WaA.DAT* – файл початкових даних.
2. *WaA11* – чисельне інтегрування рівняння (3.10).
3. *WaA21* – чисельне інтегрування рівняння (3.9) на базі залежностей (3.12) та (3.13).
4. *Wa2* – розрахунок компонент вектору швидкості підземного потоку на базі залежностей (3.14).
5. *Wa5* – здійснює «перехід» від розрахункової області першого типу до розрахункової області другого типу. .

Для контролю розрахунку параметра h – глибини ґрунтових вод, також використовується друга чисельна модель. В цьому випадку, для чисельного інтегрування рівняння фільтрації (3.9) здійснюється попередній запис його у такому вигляді (геометричне розщеплення):

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \quad (3.15)$$

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = kh_m \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}. \quad (3.16)$$

На наступному етапі використовуються такі різницеві залежності (локально-одновимірна різницева схема):

- перший крок:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \Delta t \frac{h_{i+1,j}^n - h_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-h_{i,j}^n + h_{i-1,j}^n}{\Delta x^2};$$

- другий крок:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n + \Delta t \frac{h_{i,j+1}^n - h_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-h_{i,j}^n + h_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Тут прийнято: $\Delta t = \Delta t \frac{kh_m}{\mu}$.

Після визначення параметру h виконується розрахунок компонент вектора швидкості підземного потоку на базі залежностей (3.14).

Створено комп'ютерну програму для чисельного інтегрування рівняння (3.9) на базі розглянутої чисельної моделі. Мова програмування FORTRAN. Програма побудована на модульному принципі, основні підпрограми типу SUBROUTINE є наступними:

1. Wa37.DAT – файл початкових даних.
2. Wa12 – чисельне інтегрування рівняння (3.9), перший крок розщеплення.
3. Wa13 – чисельне інтегрування рівняння (3.9), другий крок розщеплення.
4. Wa2 – розрахунок компонент вектору швидкості підземного потоку на базі залежностей (3.14).

3.3 Чисельна модель геоміграції

Для чисельного інтегрування диференціального рівняння масопереносу застосовується прямокутна різницева сітка. Концентрація домішки визначається в центрах різницевих комірок (контрольних елементів). Компоненти вектора швидкості підземного потоку були визначені на сторонах різницевих комірок: компонента u визначається на вертикальних сторонах різницевих комірок,

компонента v визначається на горизонтальних сторонах комірок. Для чисельного моделювання процесу геоміграції використовуються дві чисельної моделі.

Розглянемо побудову першої чисельної моделі. Для прогнозування забруднення підземних вод використовується наступне рівняння геоміграції:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3.17)$$

Для чисельного розв'язку рівняння геоміграції здійснюється його фізичне розщеплення:

$$\begin{aligned} n \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \\ n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Перше рівняння системи (3.18) описує зміну концентрації домішки в ґрунтових водах за рахунок руху ґрунтового потоку, а друге рівняння системи (3.18) показує зміну концентрації домішки внаслідок дисперсії.

Для чисельного інтегрування першого рівняння використовується двоетапна різницева схема (схема умовної апроксимації):

- перший етап:

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

- другий етап:

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

В даних різницевих рівняннях прийнято: $\Delta t = \frac{\Delta t}{n}$.

Для побудови чисельної моделі на базі першого рівняння системи (3.18), попередньо, здійснюються такі перетворення похідних:

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

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

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Далі, виконується наступна апроксимація похідних:

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

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

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

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

З урахування таких перетворень, для інтегрування другого рівняння системи (3.18) застосовується наступна кінцево-різницева схема розщеплення:

– на першому дробовому кроці розщеплення використовується наступне різницеве рівняння:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k = 0;$$

– на другому дробовому кроці розщеплення використовується наступне різницеве рівняння:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} = 0.$$

Тут прийнято: $\Delta t = \frac{\Delta t}{n}$.

Здійснено програмну реалізацію чисельного інтегрування рівняння геоміграції на базі схем розщеплення, розроблено комп'ютерну програму Wa3A.FOR. Підпрограмами SUBROUTINE даної програми є наступні:

1. Wa37.DAT – файл початкових даних.
2. Wa72 – чисельне інтегрування рівняння (3.9), перший крок розщеплення.
3. Wa79 – чисельне інтегрування рівняння (3.9), другий крок розщеплення.
4. Wa92 – файл початкових даних.

Розглянемо побудову другої чисельної моделі Для чисельного розв'язання рівняння геоміграції (3.17) здійснюється його розщеплення наступним чином:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (3.19)$$

$$n \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (3.20)$$

Для чисельного інтегрування (3.19) застосовується двокрокова схема розщеплення (змінно-трикутна схема розщеплення):

- на першому кроці:

$$C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = C_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j}^n + C_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2};$$

- на другому кроці:

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+1} + C_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

де $\Delta t = \frac{\Delta t}{n}$, $u^+ = \frac{u + |u|}{2}$, $u^- = \frac{u - |u|}{2}$.

Для чисельного інтегрування (3.20) застосовується наступна двокрокова схема розщеплення (змінно-трикутна схема розщеплення):

- на першому кроці:

$$C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = C_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j}^n + C_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2};$$

- на другому кроці:

$$C_{i,j}^{n+1} = C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+1} + C_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

$$\text{де } \Delta t = \frac{\Delta t}{n}, v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

На основі побудованих чисельних моделей створено комп'ютерний код Wa299. Мовою програмування є FORTRAN. Даний комп'ютерний код включає в себе:

1. Wa99.DAT – файл початкових даних (введення інформації про розмір розрахункової області, положення джерела забруднення, концентрацію домішки в підземному потоці тощо).

2. Wa91 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку концентрації домішки на першому кроці розщеплення.

3. Wa29 – підпрограма типу SUBROUTINE для друку результатів обчислювального експерименту.

3.4 Чисельні моделі теплопереносу у ґрунтових водах

Слід зазначити, що розв'язання задачі про заморожування потоку відноситься до особливо складних задач динаміки підземних вод. Це є наслідком того, що потрібно здійснювати пошук розв'язку (поле температури, швидкості підземного потоку) в області, вигляд якої змінюється з часом. Це обумовлено появою зони заморожування, тобто зони, де відсутній рух рідини. Таким чином, в потоці з'являється зона, що є непроникливою та змінює свій розмір та форму з часом.

Моделюючі рівняння даної задачі є такими:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right).$$

При розв'язанні задачі, пов'язаної з процесом заморожування потоку підземних вод, на першому етапі здійснюється чисельне інтегрування рівняння Лапласа.

Розрахунок поля температури в підземного потоку здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Значення температури визначається всередині контрольних елементів (різницевих комірок).

Для чисельного вирішення рівняння Лапласа застосовується метод Лібмана. Для чисельного розв'язання рівняння теплопереносу виконується наступне його розщеплення:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (3.22)$$

Інтегрування рівняння (3.21) здійснюється за допомогою двокрокової схеми розщеплення (змінно-трикутна схема розщеплення):

- на першому кроці:

$$T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = T_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t a_x \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t a_x \frac{-T_{i,j}^n + T_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2};$$

- на другому кроці:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- T_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t a_x \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t a_x \frac{-T_{i,j}^{n+1} + T_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

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

Інтегрування рівняння (3.22) здійснюється за допомогою наступної двокрокової схеми розщеплення (змінно-трикутна схема розщеплення):

- на першому кроці:

$$T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = T_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t a_y \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t a_y \frac{-T_{i,j}^n + T_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2},$$

- на другому кроці:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- T_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t a_y \frac{-T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t a_y \frac{-T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

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

Алгоритм розв'язання задач даного класу є наступним:

1. Формується вигляд розрахункової області.
2. Вводиться інформація про фізичні параметри задачі.
3. Задається положення свердловин, що використовуються для заморожування підземного потоку.
4. Виконується розв'язок рівняння Лапласа для потенціалу швидкості.
5. Визначаються компоненти вектору швидкості потоку.
6. Здійснюється розрахунок поля температури в потоці.
7. Визначається область, де температура потоку дорівнює «0», тобто відбулось заморожування води.

Поява льоду в потоці змінює геометрію розрахункової області, так як в зоні, де є лід, вже відсутній рух води. Тому потрібно заново вирішити задачу динаміки підземних вод та знову визначити поле швидкості підземного потоку, а далі вирішити задачу теплопереносу. Тобто процес повторюється, починаючи з п. 4.

На базі розроблених чисельних моделей створено комп'ютерний код WaTGE-2. Мовою програмування є FORTRAN. До складу комп'ютерного коду входять:

1. Wa.DAT – файл початкових даних (введення інформації про розмір розрахункової області, положення джерела забруднення, концентрацію домішки в підземному потоці, положення свердловин тощо).
2. Wa1 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку динаміки зміни глибини ґрунтових вод з часом.
3. Wa2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку компонент швидкості фільтраційного потоку.
4. Wa3 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку зміни концентрації домішки в ґрунтових водах з часом.

5. WaT3 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку зміни концентрації температури в ґрунтових водах з часом.

6. WaTV2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розрахунку компонент швидкості потоку, що використовуються при розв'язанні задачі теплопереносу.

7. WaTR2 – підпрограма типу SUBROUTINE для розв'язання рівняння для потенціалу швидкості.

3.5 Чисельні моделі масопереносу у ґрунтових водах в задачі про використанні спеціального фільтрувального елемента

Для розв'язання задачі про локальну нейтралізацію домішки шляхом використання спеціальних касет з нейтралізатором, що завантажуються у проникний бар'єр, потрібно проінтегрувати систему рівнянь (2.18)–(2.21). Для чисельного інтегрування рівняння фільтрації використовуються кінцево-різницеві схеми, що наведені в п. 3.2. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу агресивної домішки використовуються різницеві схеми, що наведені в п. 3.3.

3.6 Верифікація чисельних моделей

Верифікація чисельних моделей є важливим етапом, що передуює проведенню обчислювальних експериментів. Нижче наведено результати проведеної верифікації розроблених чисельних моделей фільтрації та тепломасопереносу. При проведенні верифікації використовувалися відомі підходи:

1. Порівняння результатів розрахунку на базі розроблених чисельних моделей з результатами експерименту.

2. Порівняння результатів розрахунку на базі розроблених чисельних моделей з результатами аналітичного розв'язку задачі.

3. Порівняння результатів розрахунку на базі розроблених чисельних моделей з результатами чисельного розв'язку задачі іншими фахівцями.

4. Проведення обчислювальних експериментів на різних сітках (дослідження збіжності розв'язку).

Розглянемо результати верифікації.

1. Тестова задача № 1. Порівняння з даними експерименту.

Експеримент проводився у фільтраційному лотку: 30см×10см×15см (рис. 3.3) [7]. В аванкамері лотка підтримувався постійний рівень води $h_1=13,5$ см (початковий переріз). Рівень води в кінцевому перерізі $h_2=3,4$ см. Температура навколишнього середовища 20 °С. Розглядалася фільтрація при горизонтальному водотриві. При проведенні експерименту вимірювалася витрата води крізь область фільтрації Q об'ємним способом та здійснювався відеозапис з метою фіксування положення фронту фільтрації $l(x)$ з часом.

На рис. 3.3 показано область фільтрації при стаціонарному режимі.

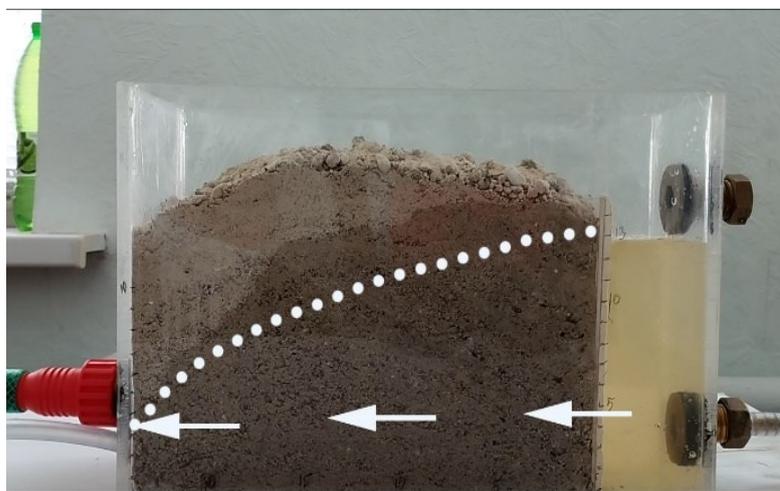


Рисунок 3.3 – Фільтраційний лоток (кафедра «Гідравліка, водопостачання та фізика», УДУНТ)

Як можна бачити з рис. 3.3, зона промочування чітко визначає область фільтрації для безнапірного потоку. На рис. 3.3 показано «крапками» криву депресії. Перевищення зони змочування вище кривої депресії обумовлено роботою капілярних сил.

Для обробки результатів експерименту використовувалася формула Дюпюї:

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_{1-2}} \quad (3.23)$$

де $q = \frac{Q}{b}$ – питома витрата води, b – ширина лотка; k – коефіцієнт фільтрації; h_1 , h_2 – глибина фільтраційного потоку в різних перерізах, довжина між якими дорівнює l_{1-2} .

Використовуючи формулу (3.23), можна визначити коефіцієнт фільтрації при заміряних глибинах фільтраційного потоку та витрати.

В табл. 3.1 наведено результати обчислювального експерименту (чисельне інтегрування рівняння фільтрації (2.13), схема розщеплення № 1 та схема розщеплення № 2) та їх порівняння з даними експерименту.

Таблиця 3.1 – Глибина фільтраційного потоку

переріз	глибина потоку, см (експеримент)	Схема розщеплення №1 (глибина потоку, см)	Схема розщеплення №2 (глибина потоку, см)
5 см	12,2	11,8	11,9
10 см	11,1	10,6	10,8
15 см	9,1	8,7	8,9
20 см	6,8	6,2	6,4

Як можна бачити з табл. 3.1, є задовільне узгодження даних експерименту та розрахунку на базі побудованих чисельних моделей.

2. Тестова задача № 2. Розрахунок на різних сітках

Рівняння (3.23) може бути використано для порівняння значення функції h при чисельному рішенні рівняння фільтрації (2.13) при розрахунку на різних сітках. Розв'язок цього рівняння знаходиться двома способами: 1) схема розщеплення № 1: (3.12) + (3.13); 2) схема розщеплення № 2: (3.15) + (3.16).

Початкові дані (І. В. Калашніков):

1. Довжина розрахункової області – 300 м.
2. Глибина підземного потоку на початку розрахункової області – 15 м, в кінці – 14,5 м.
3. Розміри розрахункової області 300 м×320 м.

4. Коефіцієнт фільтрації 10 м/добу.

5. Різнцева сітка 26×22 комірки (варіант 1) та 52×44 комірки (варіант 2).

Результати розрахунку глибини підземного потоку, отримані за допомогою (3.23) (аналітичне рішення) і зазначених чисельних методів (переріз $y=175$ м), подано в табл. 3.2, 3.3.

Таблиця 3.2 – Розрахунок глибини підземного потоку (сітка 26×22)

довжина, м	Аналітичний розв'язок / Калашніков І. В.	Схема розщеплення №1	Схема розщеплення № 2
18	14,97/14.99	14,96	14,98
30	14,95/14.97	14,93	14,96
42	14,93/14.95	14,91	14,94
54	14,91/14.93	14,89	14,92

Таблиця 3.3 – Розрахунок глибини підземного потоку (сітка 52×44)

довжина, м	Аналітичний розв'язок	Схема розщеплення №1	Схема розщеплення № 2
18	14,97	14,9677	14,9723
30	14,95	14,9473	14,9486
42	14,93	14,9342	14,9365
54	14,91	14,9134	14,9153

Як можна бачити з наведених таблиць, є задовільне узгодження даних аналітичного розрахунку та розрахунку на базі побудованих чисельних моделей. Також можна бачити задовільне узгодження результатів розрахунку на базі розроблених чисельних моделей з розрахунками іншого автора (І. В. Калашніков).

3. Тестова задача № 3. Порівняння результатів чисельного моделювання з аналітичним рішенням задачі (Логачов І. М.).

Моделюється процес всмоктування крізь щілинний відсмоктувач в стінці. Розрахункова схема наведена на рис. 3.4. Швидкість потоку в щілині на ділянці АВ $V_{\infty}=1\text{м/с}$.

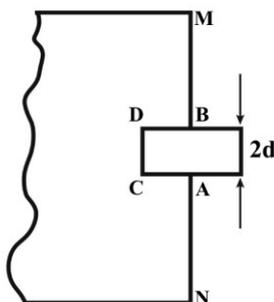


Рисунок 3.4 – Розрахункова схема (щілинний відсмоктувач, що вбудований у плоску стінку)

Перетин CD знаходиться на відстані одного калібру від входу в щілину ($AB=AC$). Ширина щілини становить $2d$. Тестується кінцево-різницева схема (3.3)+(3.4) (схема № 1) та різницева схема (3.5) (схема № 2) для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості. Результати розрахунку на базі даних різницевих схем порівнюються з розрахунком за методом граничних інтегральних рівнянь та методом конформних відображень.

Результати розрахунку показано в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення осьової швидкості потоку

$x/2d$	Розрахунок за методом граничних інтегральних рівнянь	Розрахунок за методом конформних відображень	Розрахунок на базі розроблених моделей <i>схема№1/схема№2</i>
0,5	0,631	0,645	0.648/0.651
1,0	0,470	0,471	0,481/ 0.486
1,5	0,362	0,365	0,368/0.371
2,0	0,290	0,290	0,312/0.322

Дані з табл. 3.4 показують, що має місце задовільне узгодження даних, що отримані шляхом використання розроблених моделей з даними іншого автора, який зробив аналітичні розрахунки.

4. Тестова задача №4.

Здійснюється порівняння розрахункових даних, що отримані на базі побудованих чисельних моделей масопереносу та теплопереносу (рівняння теплопереносу аналогічно рівнянню масопереносу), з аналітичним рішенням задачі та експериментом Озмідова Р. В.

Розглядається постійна емісія домішки з точкового джерела забруднення у водне середовище. Аналітичне рішення має вигляд:

$$C(x, y, z) = \frac{2q}{4\pi x \sqrt{\mu_y \mu_z}} \exp \left[-\frac{uy^2}{4\mu_y x} - \frac{uz^2}{4\mu_z x} \right].$$

Визначення концентрації здійснюється в поперечному перерізі на відстані 25 м від джерела емісії. Розрахунок здійснювався при таких вхідних даних:

$$u = 30 \text{ см/сек}; \quad q = 2.78 \cdot 10^{-2} \text{ г/сек}; \quad x_1 = 2.5 \cdot 10^3 \text{ см}; \\ \mu_y = 7.5 \cdot 10^2 \text{ см}^2/\text{сек}; \quad \mu_z = 42 \text{ см}^2/\text{сек}, \quad z = 0.$$

Результати обчислювального експерименту, дані експериментальних вимірювань та розрахунок на базі аналітичного рішення показано нижче в таблицях. Відзначимо, що друга чисельна модель масопереносу аналогічна чисельній моделі теплопереносу, тому остання колонка таблиці відповідає верифікації моделей тепломасопереносу.

Таблиця 3.5 – Значення концентрації домішки поперек струменя

Y, см	Експеримент, С·10 ⁻⁸ г/см ³	Аналітичне рішення С·10 ⁻⁸ г/см ³	Чисельна модель № 1, С·10 ⁻⁸ г/см ³	Чисельна модель № 2, С·10 ⁻⁸ г/см ³
150	0.94	0.91	0.92	0.92
200	0.69	0.85	0.83	0.83
300	0.71	0.69	0.72	0.73
400	0.52	0.53	0.54	0.54

Аналіз даних з табл. 3.5 свідчить про задовільне узгодження результатів розрахунку на базі розроблених чисельних моделей з даними експерименту та аналітичним рішенням задачі.

Висновки до розділу 3

1. Розглянуто побудову чисельних моделей для розв'язання задачі гідродинаміки ґрунтових вод при роботі дренажної системи. При реалізації розроблених чисельних моделей розрахунок невідомих параметрів здійснюється по явним формулам, але при цьому самі чисельні моделі є стійкими. Використання явних розрахункових формул допускає просту програмну реалізацію різницевих рівнянь чисельних моделей.

2. Розглянуто побудову чисельних моделей тепломасопереносу для рішення задач геоміграції. Використання обраних різницевих схем дає змогу розрахувати температуру та концентрацію агресивної домішки по явним формулам. Це дає змогу здійснити просту програмну реалізацію різницевих рівнянь моделей.

3. Виконано програмну реалізацію розроблених чисельних моделей. Створені коди являють собою інструмент розв'язання складних багатофакторних задач з оцінки ефективності роботи дренажних систем та їх елементів.

4. Результати верифікації розроблених моделей підтверджують їхню адекватність.

5. Розроблені математичні моделі дають змогу замінити складні лабораторні та натурні експерименти, скоротити час на отримання науково обґрунтованих даних щодо ефективності застосування дренажних систем.

РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДРЕНАЖУ НА ПІДТОПЛЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ

В розділі розглядається використання розроблених чисельних моделей для розв'язання наступних задач:

1. Використання проникного бар'єру для зменшення рівня забруднення підземного потоку, де планується влаштування дренажної системи.
2. Моделювання процесу заморожування ділянки підземних вод, де планується влаштування дренажної системи.
3. Моделювання роботи системи дренажу на підтопленій території в умовах забудови.

Результати даного розділу опубліковано в [4-12, 31-34, 68, 69].

4.1 Моделювання роботи проникного бар'єру

Особливістю багатьох регіонів України є те, що на підтоплених територіях підземні води мають техногенне забруднення, дуже часто – хімічне забруднення. Формування такого неприродного забруднення підземних вод пов'язане з інфільтрацією забруднення зі ставків-відстійників промислових стічних вод, інфільтрації забруднень з промислових майданчиків різних підприємств. Така ситуація має місце в м. Дніпро в області розташування метрополітену. Агресивні підземні води отримують «підживлення» стоків при інфільтрації забруднень з території багатьох промислових підприємств. Тому виникає додаткова задача, дотична до проблеми боротьби з підтопленням територій – нейтралізація забруднених підземних вод, тобто, проведення операції по поліпшенню якості підземних вод. Це пов'язано з тим, що дренаж забруднених, агресивних вод може привести до руйнування обладнання. Тому, очевидно, виникає практичне питання – що робити з агресивними підземними водами, що «вилучені» з підземного водоносного шару? Скид дренажною системою забруднених вод у водоймище є прямим техногенним забрудненням поверхневих вод, що є недопустимим. Можна використати інший підхід – встановити спеціальне обладнання на поверхні землі для нейтралізації агресивних підземних вод, що

відводить дренажна система. Але такий підхід потребує додаткових коштів. Слід підкреслити, що зараз дуже активно для розв'язання задач такого класу використовується проникний бар'єр (рис. 4.1). Забруднені підземні води проходять крізь проникний бар'єр, в якому відбувається реакція агресивної домішки з нейтралізатором, а далі після бар'єра – рух незабрудненої води. Тобто, в дренажну свердловину потрапляють підземні води, що не містять агресивної домішки. Умовно, така схема показана на рис. 4.1.

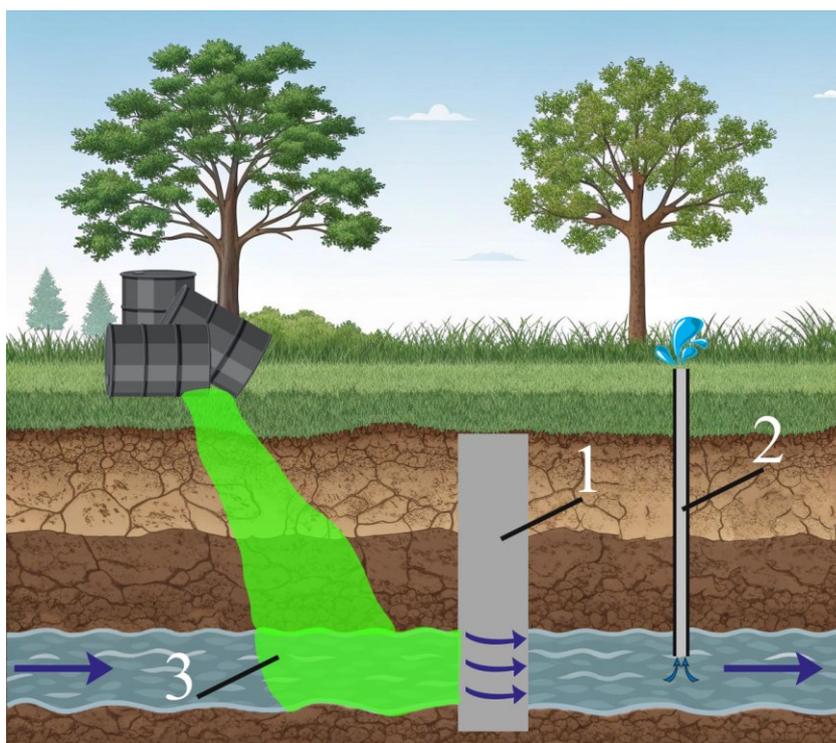


Рисунок 4.1 – Схема використання проникного бар'єру:

1 – проникний бар'єр; 2 – дренажна свердловина; 3 – забруднені підземні води

Далі представлено результати вирішення задач по визначенню ефективності роботи проникного бар'єру. Рішення задач отримано на базі розроблених вище чисельних моделей.

Розглядалися два варіанти задачі. Перший варіант – рух «плями» домішки в підземному потоці за відсутності проникного бар'єру. Другий варіант – рух «плями» домішки в підземному потоці при використанні проникного бар'єру.

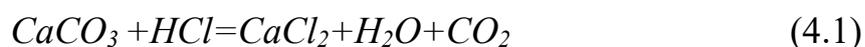
В рамках другого варіанту задачі розглядаються три сценарії:

- сценарій №1 – використовується «малий» проникний бар'єр (бар'єр розташований всередині водоносного шару);

- сценарій №2 – використовується проникний бар'єр, що не доходить до водотриву;

- сценарій №3 – використовується проникний бар'єр, що доходить до водотриву.

Для нейтралізації кислоти використовується вапно ($CaCO_3$), що міститься у проникному бар'єрі. Хімічна реакція описується наступним рівнянням кінетики:



Для розв'язання задачі гідродинаміки (профільна задача) використовується модель потенціального руху. Концентрація кислоти в області забруднення 200 г/л. Концентрація вапна всередині захисного бар'єру 900 г/л; швидкість руху підземного потоку 0.0001 м/с. Довжина розрахункової області 12 м, ширина 10.5 м. Початкова хмара забруднювача в підземному потоці має складну геометричну форму – у вигляді «краплі» (рис. 4.2).

Параметри дисперсії розраховуються так:

$$\mu_x = 0.1u, \mu_y = 0.1v.$$

Значення компонент u , v вектора швидкості підземного потоку визначаються при розв'язанні задачі гідродинаміки, тобто після чисельного рішення рівняння для потенціалу швидкості.

Значенню $Y=0$ відповідає поверхня водотриву. Результати обчислювального експерименту наведено у двох варіантах: у вигляді матриці концентрації кислоти в підземному потоці та у вигляді ізоліній концентрації кислоти в підземному потоці. Презентація результатів математичного моделювання у вигляді матриці має наступну перевагу: можливість оперативно визначити рівень (*інтенсивність*) забруднення підземних вод водоносного горизонту у будь-якій точці області дослідження, що неможливо зробити швидко, якщо презентація результатів зроблена у вигляді ізоліній (тут вже потрібна інтерполяція результатів обчислювального експерименту). Тому презентація результатів

моделювання у вигляді матриці є основним форматом презентації концентрації кислоти (температури) в області дослідження. З іншого боку – презентація результатів математичного експерименту у вигляді ізоліній має наступну перевагу – можливість швидко визначати *форму* області забруднення.

Слід підкреслити, що друк результатів у вигляді матриці зроблено у форматі «INTENGER», тобто, на друк не видається дробова частина числа. Наприклад, якщо в даній точці концентрація кислоти дорівнює 7,8 г/л, то на друк видається лише ціла частина, тобто «7». Такий друк дає можливість зробити «упорядковану» презентацію чисел (концентрацію кислоти) в області дослідження для швидкого аналізу інтенсивності забруднення підземного потоку на різних ділянках.

Нижче на рисунках показано, як розвивається область забруднення в підземному потоці за відсутності проникного бар'єру (перший варіант задачі, профільна задача). Слід відзначити, що для даного варіанту задачі розглядається «розвиток» з часом хмари забруднення, що утворилася в потоці, наприклад, внаслідок аварійного витoku агресивної речовини на сховищі (рис. 4.2). Зовнішнього «підживлення» ця хмара не має, тобто розглядається складна задача з точки зору математичного моделювання – визначення розмірів та інтенсивності області забруднення підземних вод з часом внаслідок міграції області забруднення. В такій постановці задачі, концентрація кислоти з часом буде змінюватися в кожній точці підземного водоносного шару, а динаміка цього процесу визначається шляхом розрахунку на базі розроблених чисельних моделей. На наведених нижче матрицях можна чітко бачити зміну концентрації домішки у підземному потоці для різних моментів часу. Рисунки, що ілюструють ізолінії концентрації домішки, дають можливість чітко бачити, як змінюється з часом форма області забруднення.

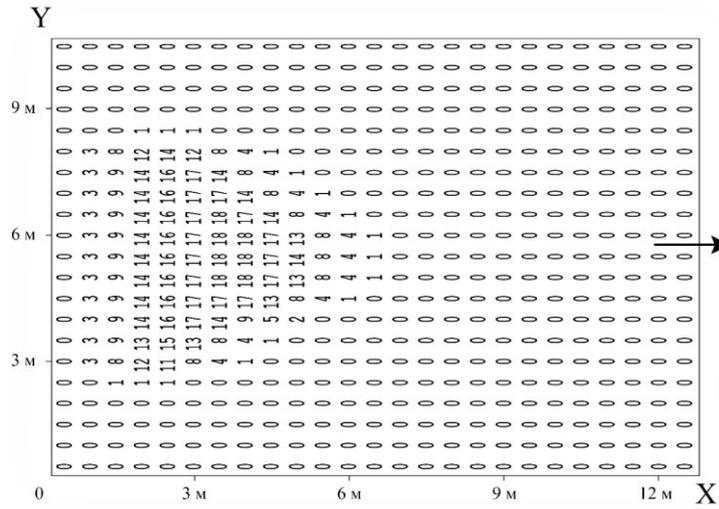


Рисунок 4.2 – Область забруднення в підземному потоці, концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³, $t=4,16$ год (бар'єр відсутній)

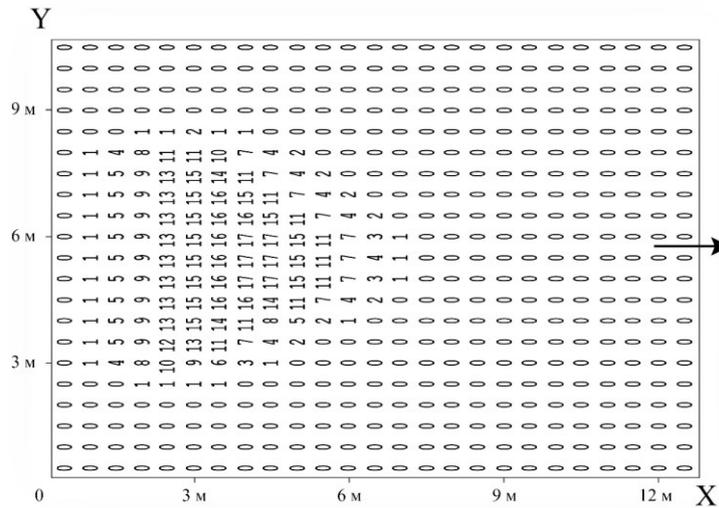


Рисунок 4.3 – Область забруднення в підземному потоці, концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³, $t=6,94$ год (бар'єр відсутній)

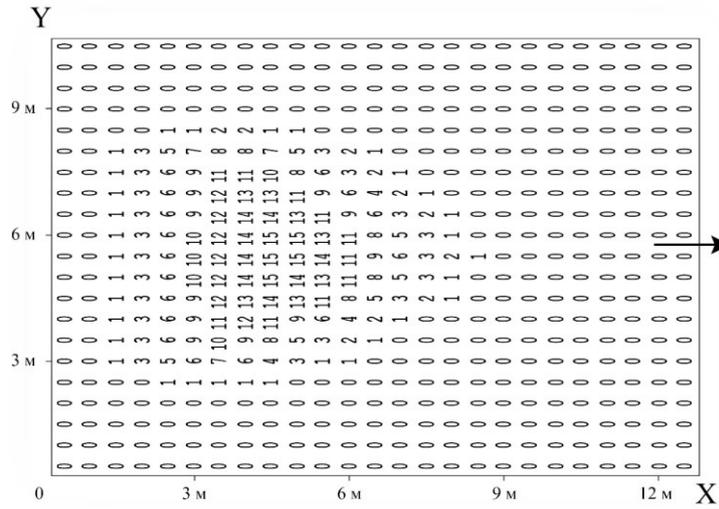


Рисунок 4.4 – Область забруднення в підземному потоці, концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³, $t=11,11$ год (бар'єр відсутній)

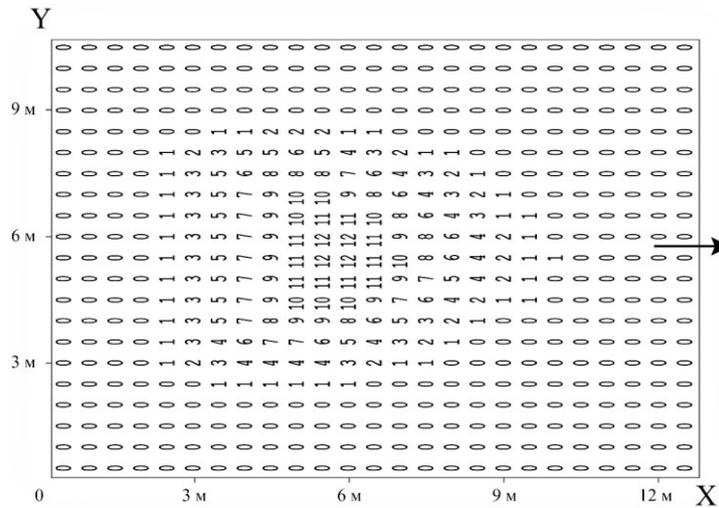


Рисунок 4.5 – Область забруднення в підземному потоці, концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³, $t=15,27$ год (бар'єр відсутній)

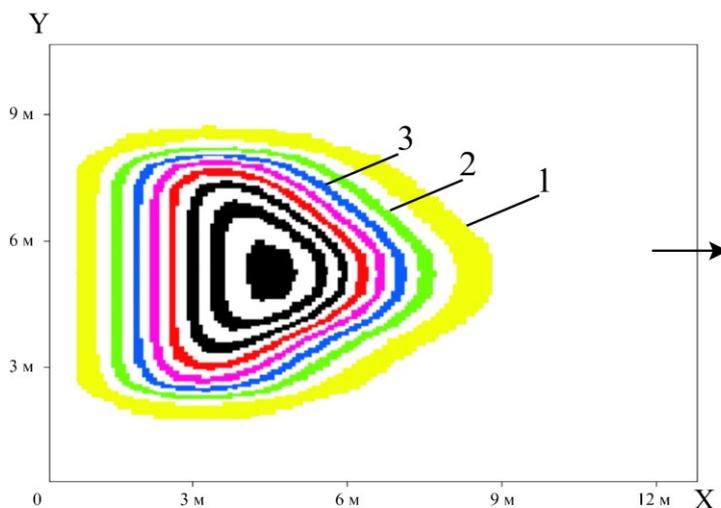


Рисунок 4.6 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці
(перший варіант, бар'єр відсутній), $t=4,11$ год:
1 – $C=18,4$ г/м³; 2 – $C=43,2$ г/м³; 3 – $C=67,5$ г/м³

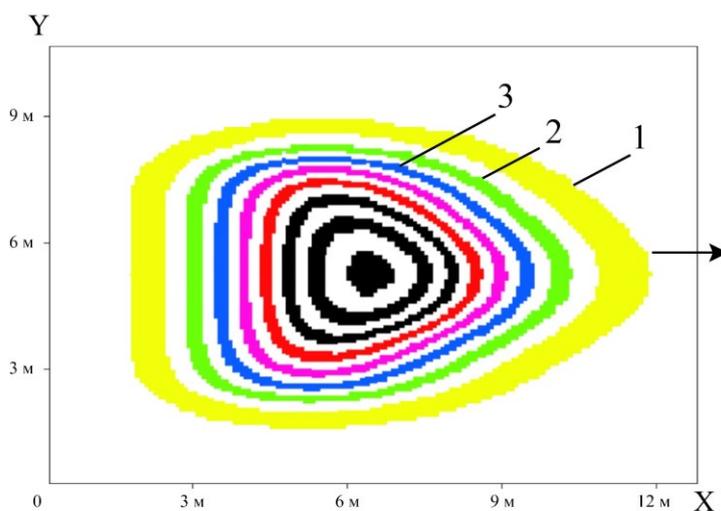


Рисунок 4.7 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці
(перший варіант, бар'єр відсутній), $t=18,61$ год:
1 – $C=10,7$ г/м³; 2 – $C=25,0$ г/м³; 3 – $C=39,2$ г/м³

Як можна бачити з рис. 4.2-4.7, концентрація домішки в підземних водах зменшується з часом, чому є фізичне пояснення – відсутність «підживлення» початкової хмари забруднювача. Аналіз рис. 4.6 та рис. 4.7 показує, що початкова форма області забруднення (див. рис. 4.2) повільно змінюється:

«хмара» витягується в напрямку руху підземного потоку, розміри плями збільшуються внаслідок процесу дисперсії. До моменту часу $t=18,61$ год значна частина підземного потоку забруднення по глибині.

Далі наведено результати розрахунку для сценарію №1, в якому використовується «малий» проникний бар'єр, розташований всередині водоносного шару.

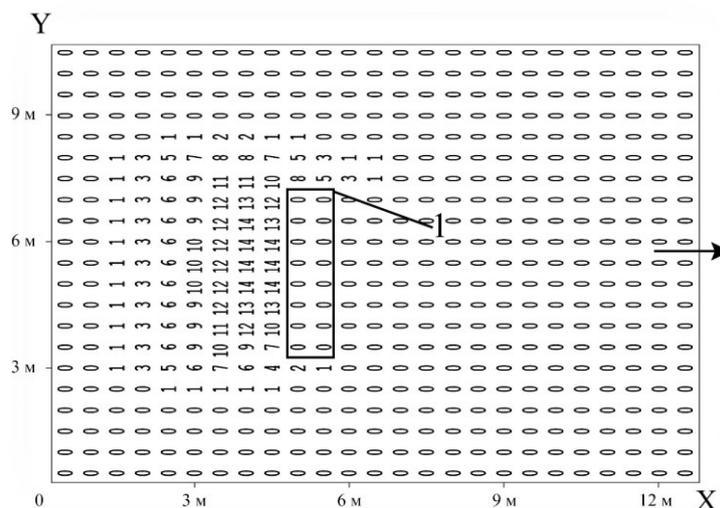


Рисунок 4.8 – Область забруднення в підземному потоці, концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1} \text{ г/м}^3$, $t=11,11$ год («малий» проникний бар'єр)

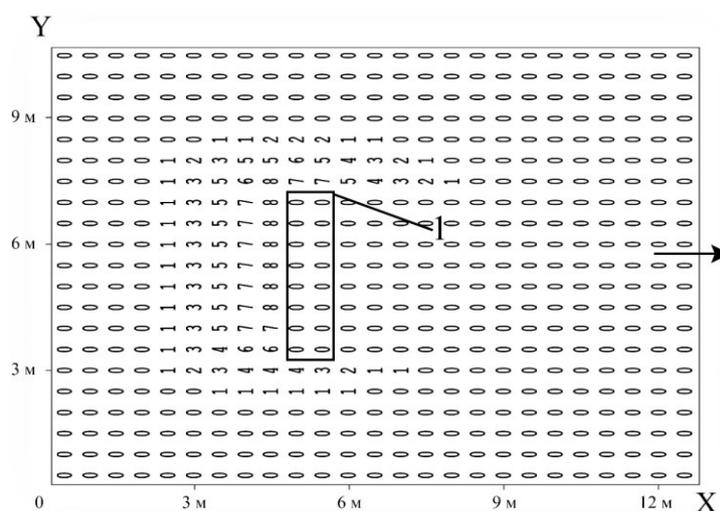


Рисунок 4.9 – Область забруднення в підземному потоці, концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1} \text{ г/м}^3$, $t=15,27$ год («малий» проникний бар'єр)

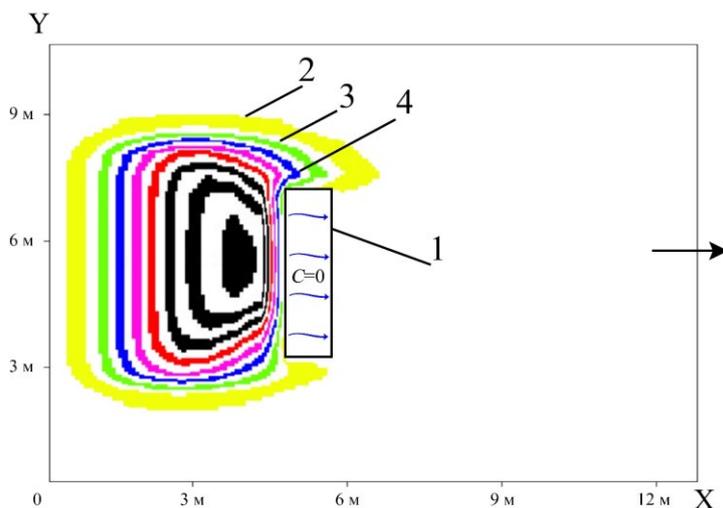


Рисунок 4.10 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці

(«малий» проникний бар'єр), $t=8,2$ год:

1 – $C=16,1$ г/м³; 2 – $C=37,2$ г/м³; 3 – $C=58,8$ г/м³

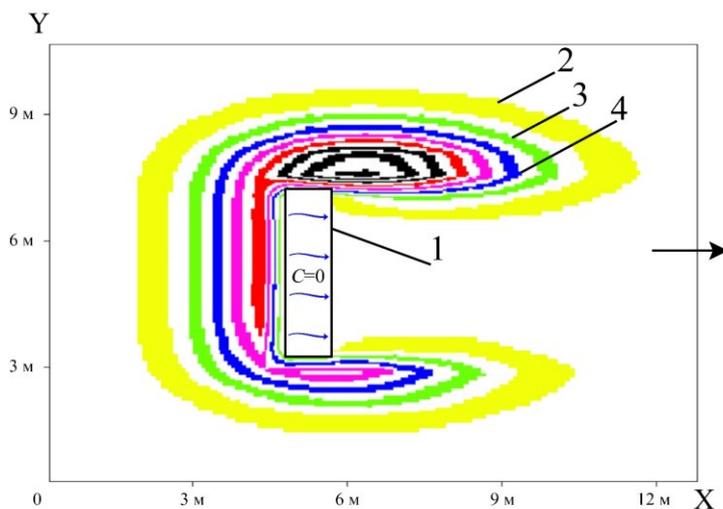


Рисунок 4.11 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці

(«малий» проникний бар'єр), $t=22,9$ год:

1 – $C=4,4$ г/м³; 2 – $C=10,4$ г/м³; 3 – $C=16,4$ г/м³

Аналіз даних, наведених на рис. 4.8-4.11, показує, що для даного сценарію захисна функція бар'єру – мінімальна. Можна чітко бачити формування двох підзон забруднення, що «обходять» захисний бар'єр зверху та знизу. Тобто, якщо

далі, по потоку, буде розташовуватися свердловина для дренажу, то в неї будуть потрапляти агресивні підземні води.

Далі наведено результати розрахунку для сценарію №2 – використання проникного бар'єру, що не доходить до водотриву.

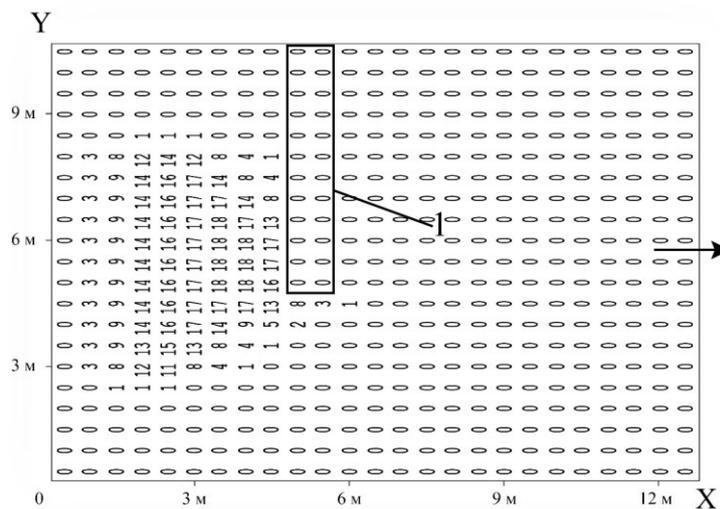


Рисунок 4.12 – Область забруднення в підземному потоці,
концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³, $t=4,16$ год
(проникний бар'єр, що не доходить до водотриву)

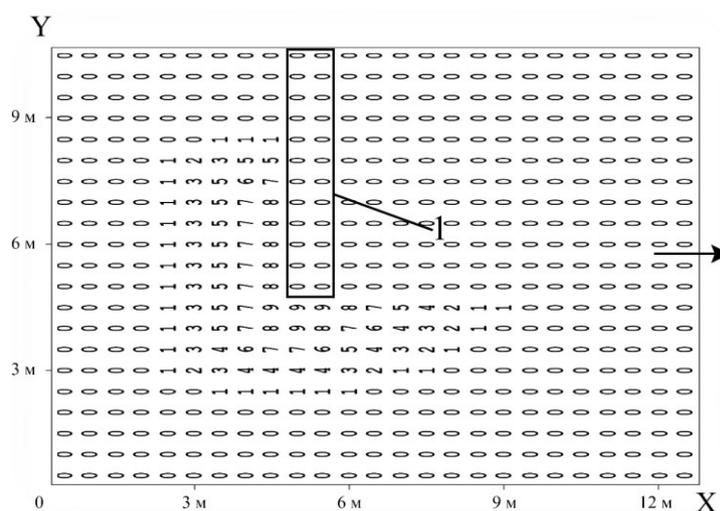


Рисунок 4.13 – Область забруднення в підземному потоці,
концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³, $t=15,27$ год
(проникний бар'єр, що не доходить до водотриву)

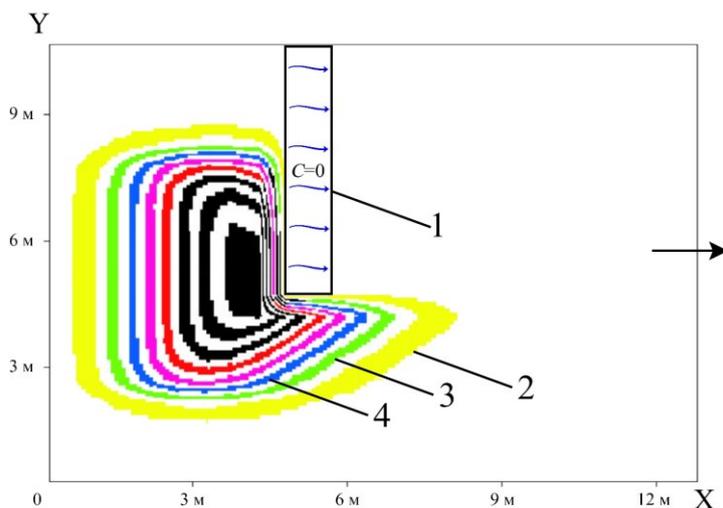


Рисунок 4.14 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці
(проникний бар'єр, що не доходить до водотриву), $t=9,7$ год:

$$1 - C=14.2 \text{ г/м}^3; 2 - C=33.3 \text{ г/м}^3; 3 - C=52.2 \text{ г/м}^3$$

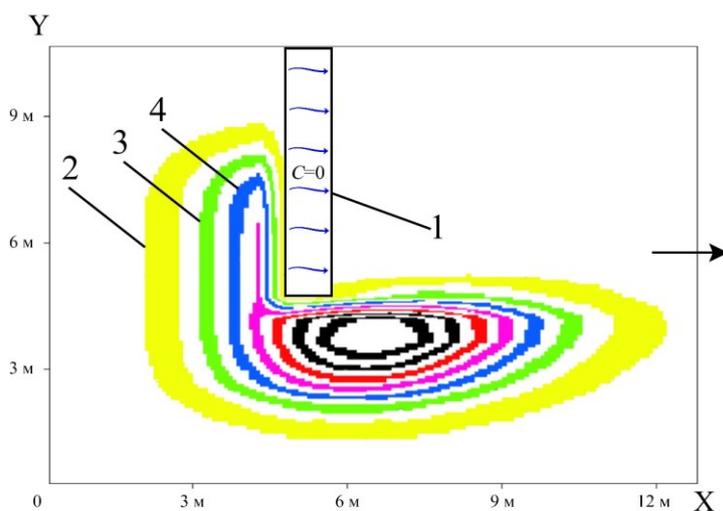


Рисунок 4.15 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці
(проникний бар'єр, що не доходить до водотриву), $t=25,11$ год:

$$1 - C=14,0 \text{ г/м}^3; 2 - C=33,2 \text{ г/м}^3; 3 - C=52,1 \text{ г/м}^3$$

Аналіз даних, наведених на рис. 4.12-4.15, показує, що для даного сценарію захисна функція бар'єру є більшою, ніж для першого сценарію, але частина домішки проходить під бар'єром, що призводить до подальшого забруднення підземного водоносного горизонту практично на 30 % по глибині. Тобто, якщо

далі, по потоку, буде розташовуватися свердловина для дренажу, то в неї будуть потрапляти агресивні підземні води.

Далі наведено результати розрахунку для сценарію №3 – використання проникного бар'єру, що доходить до водотриву.

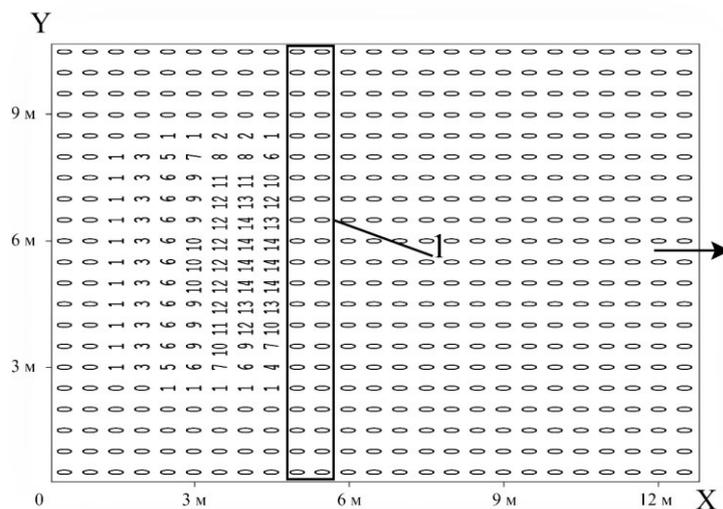


Рисунок 4.16 – Область забруднення в підземному потоці,
концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³, $t=11,11$ год
(проникний бар'єр, що доходить до водотриву)

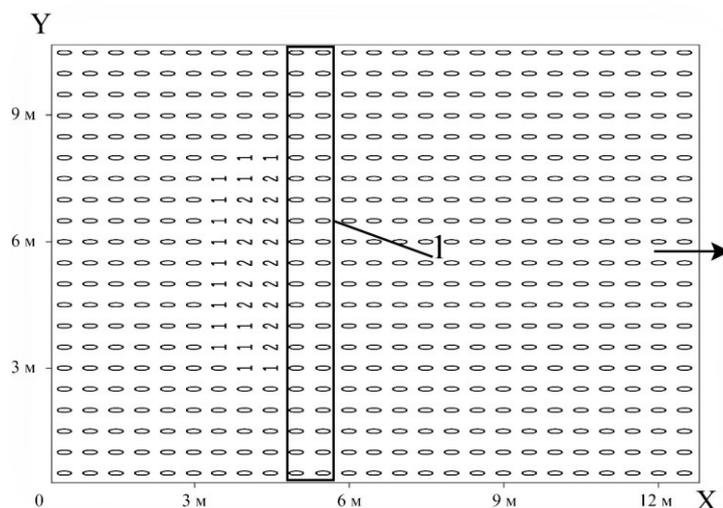


Рисунок 4.17 – Область забруднення в підземному потоці,
концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³, $t=24,59$ год
(проникний бар'єр, що доходить до водотриву)

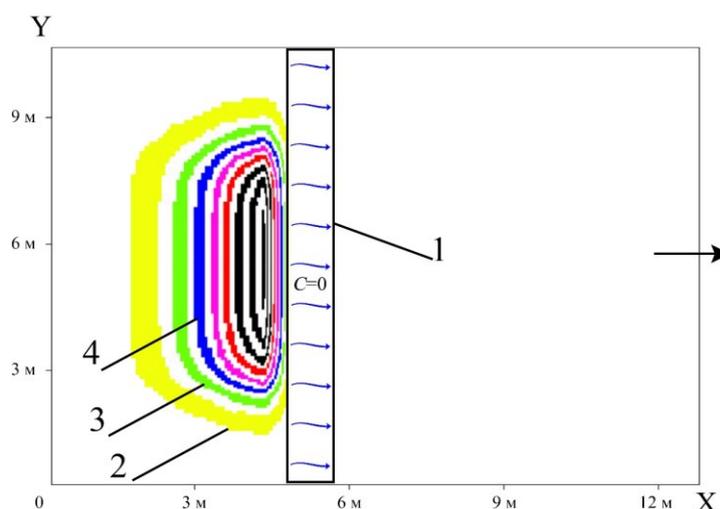


Рисунок 4.18 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці

(проникний бар'єр, що доходить до водотриву), $t=24,59$ год:

$$1 - C=2,8 \text{ г/м}^3; 2 - C=6,6 \text{ г/м}^3; 3 - C=10,4 \text{ г/м}^3$$

Аналіз даних, наведених на рис. 4.16-4.18, показує, що для даного сценарію бар'єр має високу ефективність. Підземні води, що пройшли крізь бар'єр, не містять агресивної домішки. Таким чином, проникний бар'єр, що доходить до водотриву, повністю «захищає» свердловину системи дренажу від потрапляння в неї агресивної домішки.

Далі наведено результати розв'язання планової задачі, розрахунок динаміки підземних вод виконано на базі моделі потенціального руху. Параметри задачі аналогічні тим, що були в попередній задачі. Розрахункова схема показана на рис. 4.19.

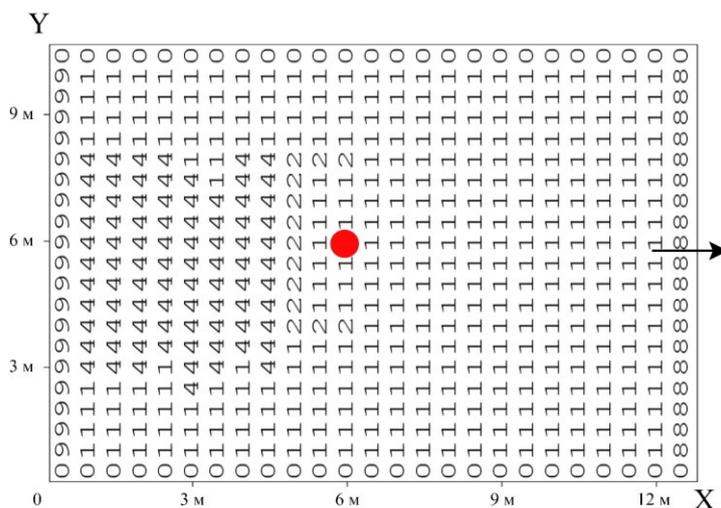


Рисунок 4.19 – Розрахункова схема: маркер «2» – форма проникного бар’єра в плані; маркер «4» – область забруднення; маркер «1» – область руху підземних вод; «червоне коло» – місце проєктного розташування дренажної свердловини

Як можна бачити з рис. 4.19, проникний бар’єр, що має «П»-подібну форму, захищає свердловину від забруднення. Область забруднення в підземних водах має складну геометричну форму (маркер «4», рис. 4.19). Ставиться задача – з’ясувати, на етапі проведення проектних робіт, чи забезпечує така форма бар’єра захист свердловини від забруднення?

Результати обчислювального експерименту показано нижче на рисунках.

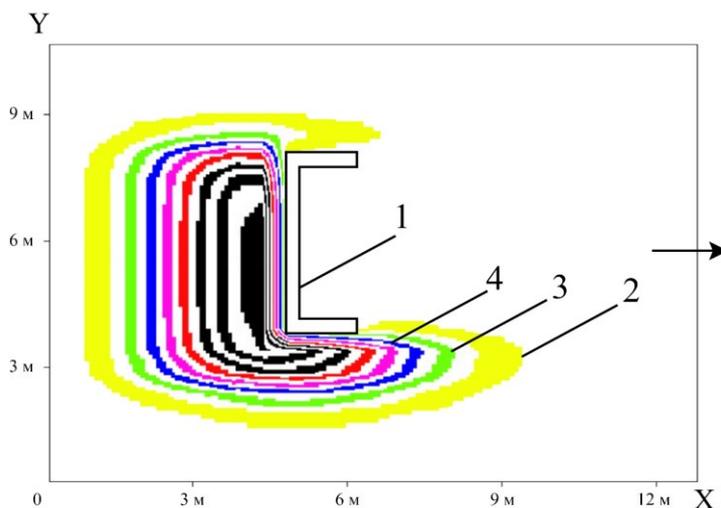


Рисунок 4.20 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці (планова задача), $t=11,47$ год: 1 – проникний бар'єр; 2 – $C=12,6$ г/м³; 3 – $C=29,4$ г/м³; 4 – $C=46,2$ г/м³

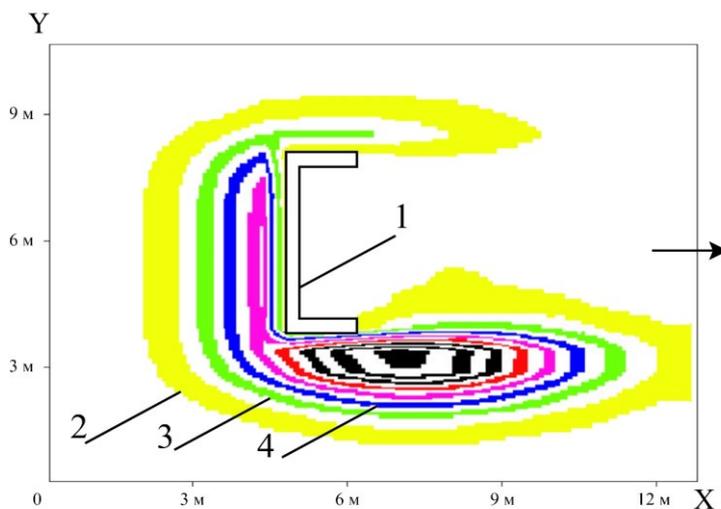


Рисунок 4.21 – Ізолінії концентрації кислоти в підземному потоці (планова задача), $t=22,91$ год: 1 – проникний бар'єр; 2 – $C=5,5$ г/м³; 3 – $C=13,0$ г/м³; 4 – $C=20,4$ г/м³

Як можна бачити з рис. 4.20 та рис. 4.21, дана форма проникного бар'єру не забезпечує захист свердловини від потрапляння агресивних підземних вод. З лівого боку бар'єру формується шлейф, що потрапляє в зону «впливу» при роботі

свердловини. Таким чином, в свердловину будуть потрапляти забруднені (агресивні) підземні води.

Як підсумок цих досліджень слід відзначити, що використання моделі потенціального руху для розв'язання задач даного класу є дуже ефективним, що підтверджують результати проведених обчислювальних експериментів: розрахунок кожного сценарію триває 1 с комп'ютерного часу. Важливим є те, що при використанні даної моделі потрібно задати лише швидкість підземного потоку. Це важливо на етапі проведення розрахунків при певному дефіциті даних для реалізації моделі фільтрації.

Далі наведено результати обчислювального експерименту по визначенню ефективності використання проникного бар'єру на базі моделі планової фільтрації (Розділ 2). Математичне моделювання виконано для таких параметрів: розміри розрахункової області 500м×420м; порозність 0,3; коефіцієнт фільтрації 20 м/добу; глибина ґрунтових вод на початку розрахункової області 25 м, глибина ґрунтових вод наприкінці розрахункової області 20 м; нестача насичення 1. Розглядається ситуація, коли в підземному потоці є хмара агресивної домішки (кислота *HCl*), концентрація домішки в хмарі 140 г/л. Початкова хмара забруднювача має складну геометричну форму (рис. 4.22).

Математичне моделювання на базі розроблених чисельних моделей виконано для наступних сценаріїв:

1. Рух хмари домішки в потоці ґрунтових вод при відсутності дренажної свердловини (сценарій № 1).

2. Рух хмари домішки в потоці ґрунтових вод при наявності дренажної свердловини, що «працює», та при відсутності проникного бар'єру (сценарій № 2).

3. Рух хмари домішки в потоці ґрунтових вод при наявності дренажної свердловини, що «працює», та при наявності проникного бар'єру (сценарій № 3).

Нижче на рисунках наведено результати обчислювальних експериментів. На рис. 4.22 представлено схему розрахункової області для сценарію № 1.

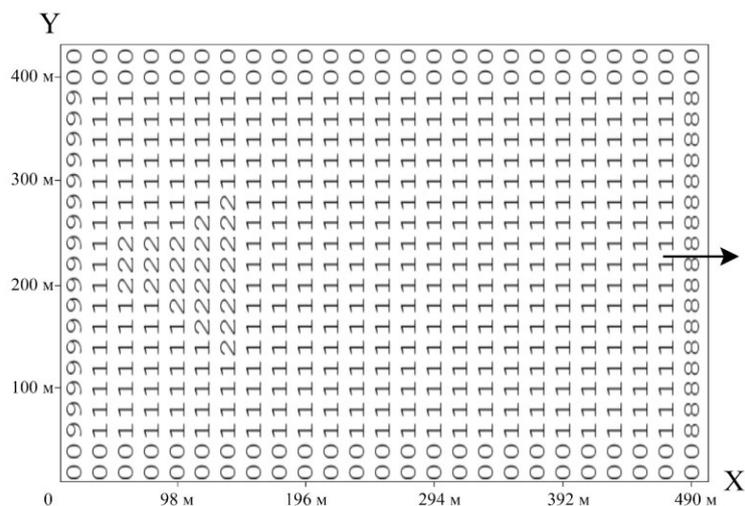


Рисунок 4.22 – Схема розрахункової області (сценарій № 1):

маркер «1» – область руху ґрунтових вод; маркер «2» – область забруднення

На рис. 4.23, 4.24 показано поле концентрації домішки в потоці ґрунтових вод для сценарію № 1, час $t=54$ доби.

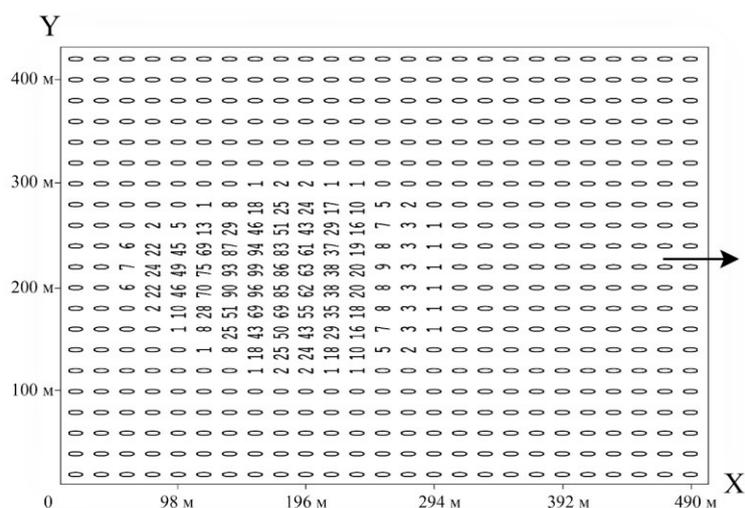


Рисунок 4.23 – Концентрація домішки C , г/л в потоці ґрунтових вод,
 $t=54$ доби (сценарій № 1)

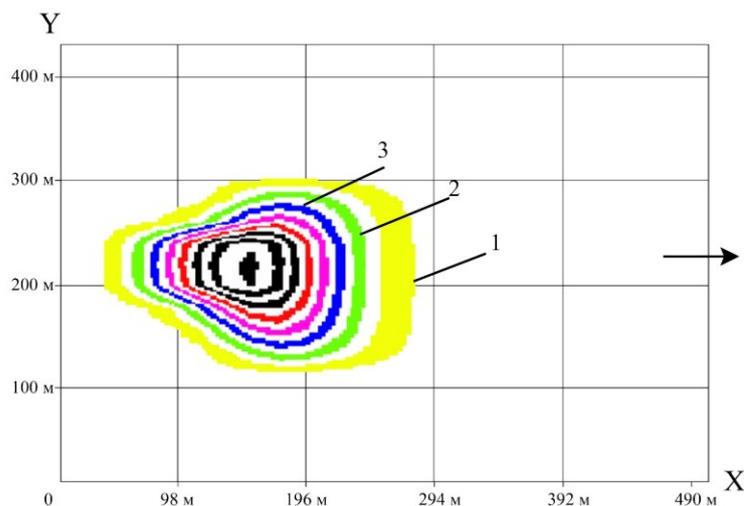


Рисунок 4.24 – Ізолінії концентрації домішки в потоці ґрунтових вод, $t=54$ доби (сценарій № 1): 1 – $C=12,0$ г/м³; 3 – $C=27,9$ г/м³; 4 – $C=43,8$ г/м³

Як можна бачити з наведених рисунків, при відсутності бар'єра та свердловини початкова форма області забруднення повільно змінюється: «хмара» витягується в напрямку руху підземного потоку, розміри плями збільшуються внаслідок процесу дисперсії.

На рис. 4.25 представлено схему розрахункової області для сценарію № 2. Далі, на рис. 4.26, наведено поле глибин потоку ґрунтових вод, а на рис. 4.27 – область забруднення при роботі дренажної свердловини для певного моменту часу. При розрахунку приймалось, що рівень води в свердловині $h=15$ м, водотрив – горизонтальний. Відзначимо, що в якості внутрішньої граничної умови для різницевої комірки, де розташована дренажної свердловини, ставиться умова для концентрації $C=0$. Фізично це означає, що домішка «не затримується» всередині комірки, а відкачується з свердловини.

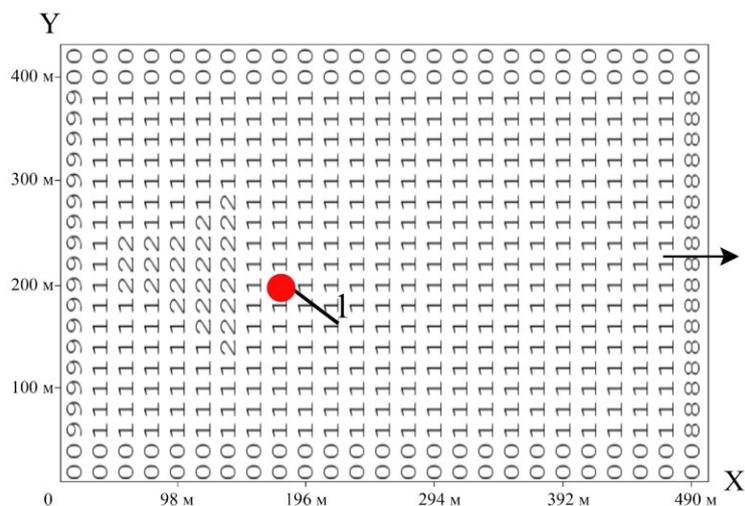


Рисунок 4.25 – Схема розрахункової області (сценарій № 2, працює дренажна свердловина): маркер «1» – область руху ґрунтових вод; маркер «2» – область забруднення; червоне «коло» – положення дренажної свердловини

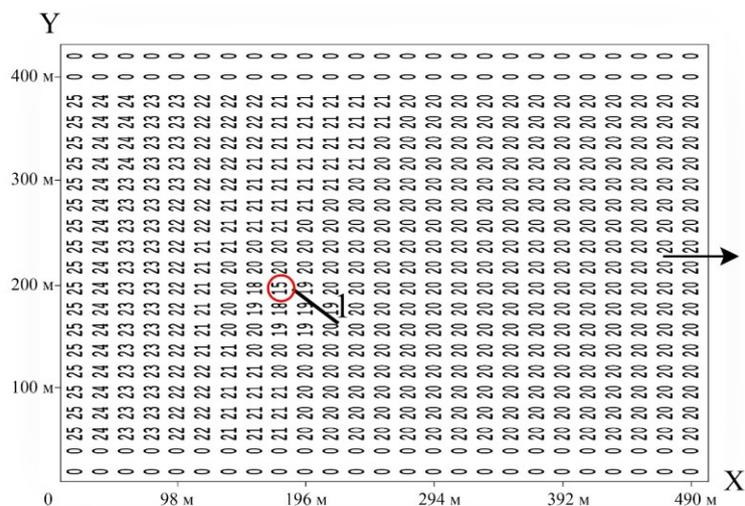


Рисунок 4.26 – Глибина ґрунтових вод, м при роботі дренажної свердловини

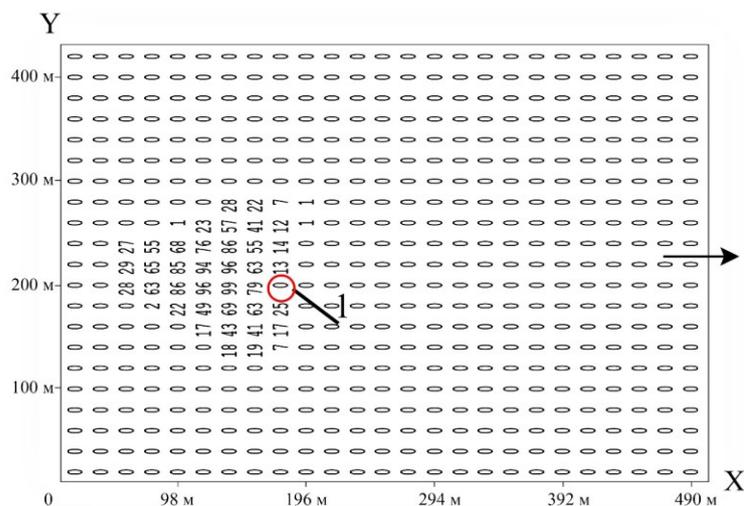


Рисунок 4.27 – Концентрація домішки C , г/л в потоці ґрунтових вод,
 $t=8,1$ доби (сценарій № 2)

Як можна бачити з рис. 4.27, за дренажною свердловиною формується область «чистого» потоку. Це має наступне пояснення – дренажна свердловина «працює» як захисний засіб, свердловина здійснює відкачку забрудненої підземної води. Для визначення кількості домішки, що потрапляє у дренажну свердловину, була розроблена підпрограма типу SUBROUTINE «WER». Ця підпрограма виконує наступні розрахунки:

1. Здійснюється розв’язання задачі масопереносу та визначається поле концентрації агресивної домішки в області дослідження для певного моменту часу.

2. Для контрольного елемента « i, j », де розташовується свердловина, визначаються бічні сторони «1», «2», «3», «4» (рис. 4.28).

3. Визначається рівень ґрунтових вод в кожному контрольному елементі, що є дотичними до сторін комірки « i, j », а саме $h_{i+1,j}$, $h_{i-1,j}$ і т.д. Ці параметри відомі, оскільки виконано чисельне інтегрування рівняння фільтрації безнапірного фільтраційного потоку. Слід відзначити, що значення рівня ґрунтових вод h_c в свердловині задається. Далі розраховуються компоненти вектора швидкості потоку ґрунтових вод на бічних елементах за формулою Дарсі.

4. Визначається потік маси крізь бічні елементи «1», «2», «3», «4» в контрольний елемент « i, j » за час dt . Наприклад, потік маси з контрольного елемента « $i-1, j$ » в контрольний елемент « i, j » розраховується так:

$$M_1 = n^{-1} \cdot dt \cdot S_1 \cdot u(i, j) \cdot C(i-1, j),$$

де $S_1 = \frac{h_{i-1,j} + h_{i,j}}{2}$ – площа, крізь яку рухається потік ґрунтових вод до свердловини; n – порозність.

Слід відзначити, що, як і раніше, компоненти вектора швидкості потоку ґрунтових вод визначаються на бічних сторонах контрольних елементів.

Аналогічно визначається маси домішки M_2, M_3, M_4 , що проходять крізь інші бічні елементи. Далі, результуюча маса, що проходить в контрольну комірку « i, j », розраховується так:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4.$$

Результати розрахунку за даним алгоритмом наведено в табл. 4.1, в якій показано кількість агресивної домішки, що потрапила в дренажну свердловину за певний проміжок часу.

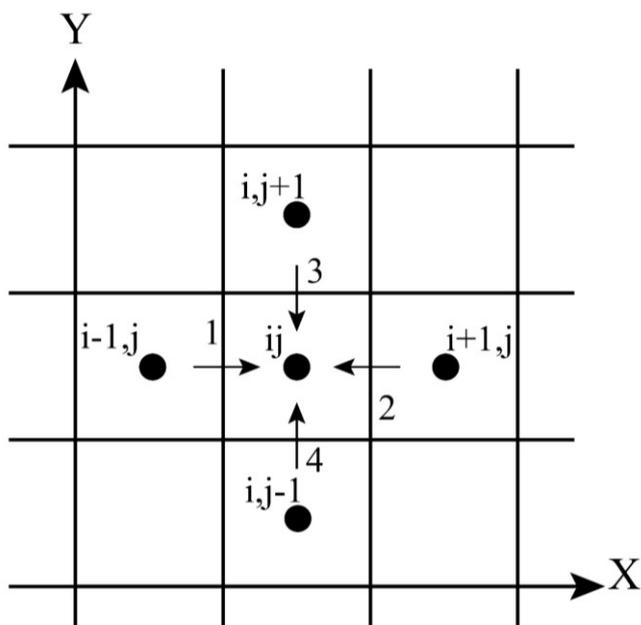


Рисунок 4.28 – Визначення потоків до контрольного елемента « i, j », де розташована свердловина

Таблиця 4.1 – Кількість агресивної домішки, що потрапила в дренажну свердловину з часом

Час, доба	Кількість домішки
1,1	$0.10 \cdot 10^5$ г
1,5	$0.17 \cdot 10^5$ г
2,1	$0.30 \cdot 10^5$ г

Аналізуючи дані з табл. 4.1 можна зробити висновок, що буде мати місце інтенсивне забруднення дренажної системи агресивною домішкою. Така ситуація є несприятливою та ставиться задача по її уникненню. Таким чином, потрібно здійснити захист дренажної системи від забруднення за допомогою проникного бар'єру – це сценарій № 3.

Результати обчислювального експерименту для сценарію № 3 показано нижче на рисунках. На рис. 4.29 показано схему розрахункової області для сценарію № 3. На рис. 4.30-4.32 показано область забруднення при роботі дренажної свердловини для певного моменту часу. При розрахунку також приймалося, що рівень води в свердловині $h=15$ м, водотрив – горизонтальний. Слід відзначити, що в якості внутрішньої граничної умови для різницевої комірки, де розташована дренажної свердловини, теж ставилася умова $C=0$.

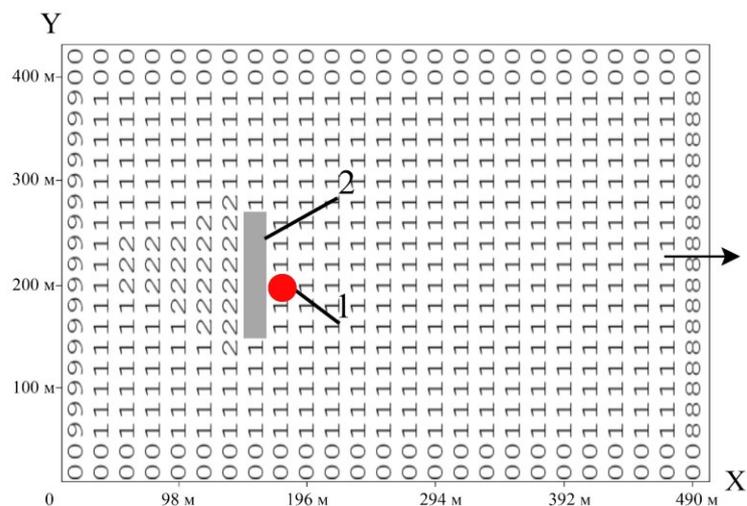


Рисунок 4.29 – Схема розрахункової області (сценарій № 3, працює дренажна свердловина та проникний бар'єр): 1 – положення дренажної свердловини; 2 – проникний бар'єр

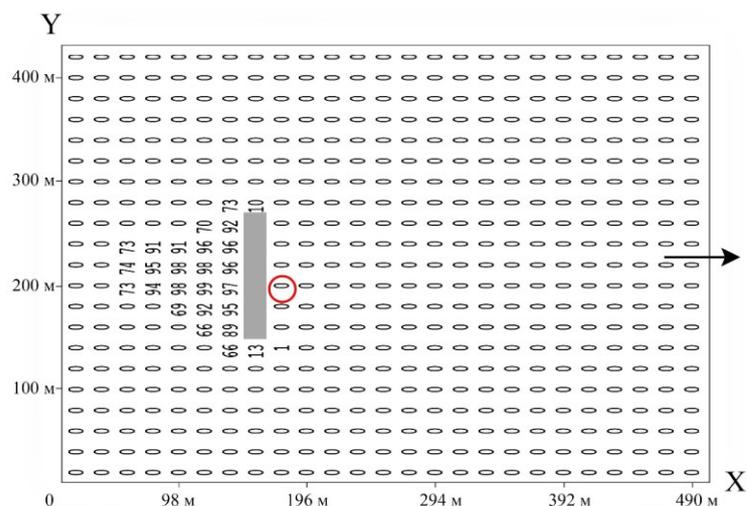


Рисунок 4.30 – Концентрація домішки C , г/л в потоці ґрунтових вод, $t=1,8$ доби (сценарій № 3)

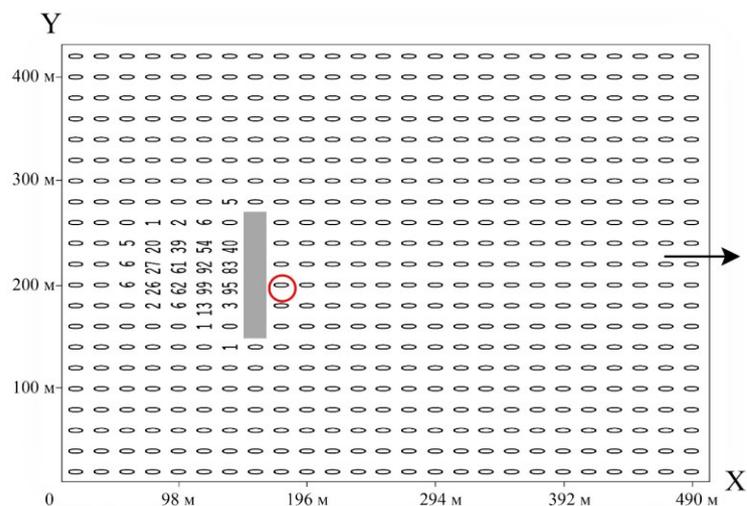
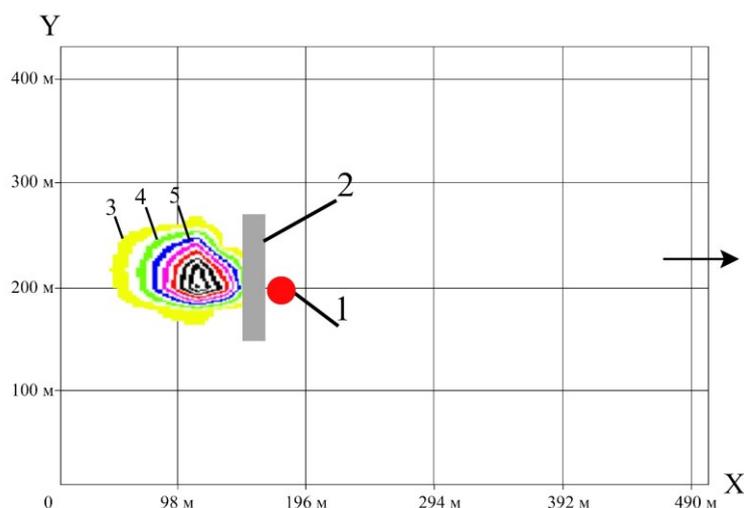


Рисунок 4.31 – Концентрація домішки C , г/л в потоці ґрунтових вод,
 $t=25,2$ доби (сценарій № 3)



36

Рисунок 4.32 – Ізолінії концентрація домішки в потоці ґрунтових вод,
 $t=36$ діб (сценарій № 3): 1 – положення дренажної свердловини; 2 – бар'єр;
 3 – $C=12,0$ г/м³; 4 – $C=27,9$ г/м³; 5 – $C=43,8$ г/м³

Як можна бачити з наведених вище рисунків, використання проникного бар'єру дає можливість захистити дренажну свердловину від потрапляння агресивної домішки – дренажна свердловина «працює» в потоці ґрунтових вод, що не містять агресивну домішку.

Слід відзначити, що час розрахунку кожного сценарію на базі розробленої моделі складає 2 с.

4.2 Моделювання роботи системи «проникний бар'єр + непроникний бар'єр»

В даній роботі була висунута робоча гіпотеза, що для здійснення захисту дренажної свердловини від забруднення замість використання проникного бар'єру, розташованого до водотриву, можна використовувати систему «проникний бар'єр + непроникний бар'єр». Відзначимо, що використання такої системи дає можливість зменшити кількість нейтралізатора в проникному бар'єрі, що в свою чергу зменшить загальну вартість спорудження системи захисту, оскільки вартість самого непроникного бар'єру (матеріал – пластик, метал тощо) є невеликою.

Далі показано результати розв'язання даної задачі на базі розроблених чисельних моделей. Розрахунок динаміки підземних вод (профільна задача) здійснено на базі моделі потенціального руху.

Концентрація кислоти в області забруднення для моменту часу $t=0$, форма області забруднення в потоці підземних вод, концентрація вапна всередині захисного бар'єру є такими ж, як в задачі, що розглянута в п. 4.1. Довжина розрахункової області 12 м, ширина 10,5 м; швидкість руху підземного потоку 0,0001 м/с. Коефіцієнт дисперсії розраховуються за приведеними в п. 4.1 залежностями. Початкова хмара забруднювача в підземному потоці має складну геометричну форму – у вигляді «краплі» (рис. 4.33).

Результати обчислювального експерименту наведено для двох сценаріїв:

1. Сценарій № 1 – непроникний бар'єр, що не доходить до водотриву (цей бар'єр можна назвати «недосконалий»). На рис. 4.33 непроникний бар'єр умовно показано маркером «0».

2. Сценарій № 2 – система «проникний бар'єр + непроникний бар'єр». Тут непроникний бар'єр аналогічний тому, що був для сценарію № 1, а до водотриву доходить проникний бар'єр. На рис. 4.34 непроникний бар'єр умовно показаний маркером «0», а проникний бар'єр умовно показаний маркером «2».

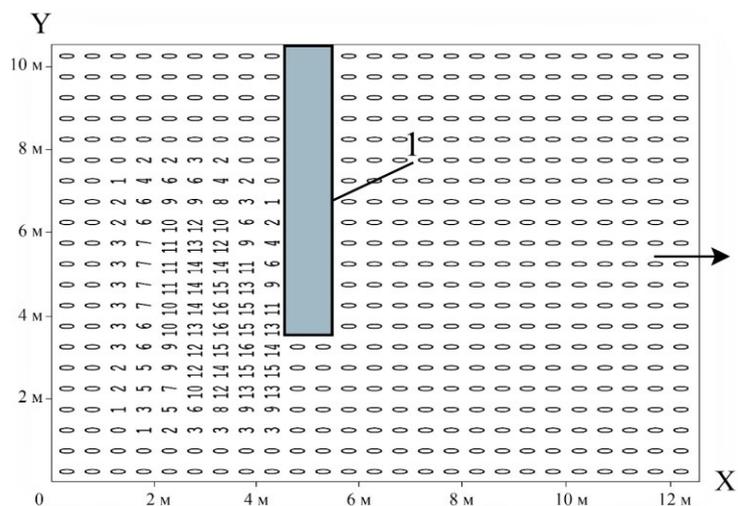


Рисунок 4.35 – Концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1}$ г/м³ (лише непроникний бар'єр, сценарій № 1), $t=8,2$ год: 1 – непроникний бар'єр

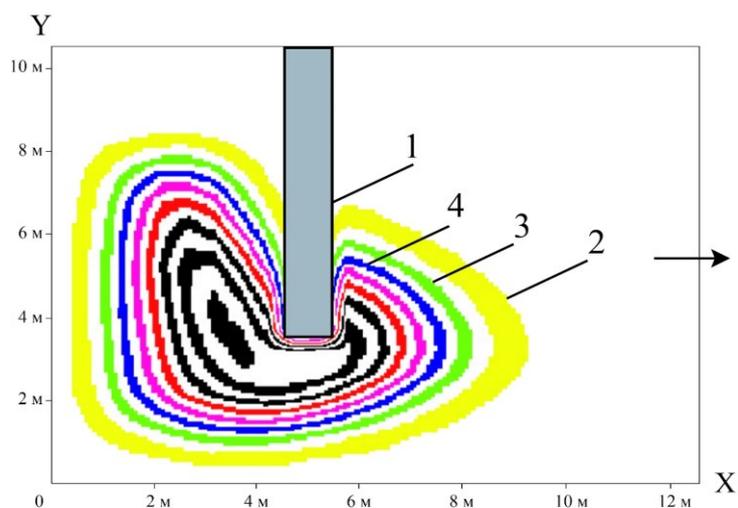


Рисунок 4.36 – Ізолінії концентрації кислоти (лише непроникний бар'єр, сценарій № 1), $t=8,2$ год:
1 – бар'єр; 2 – $C=16,3$ г/л; 3 – $C=38,0$ г/л; 4 – $C=59,8$ г/л;

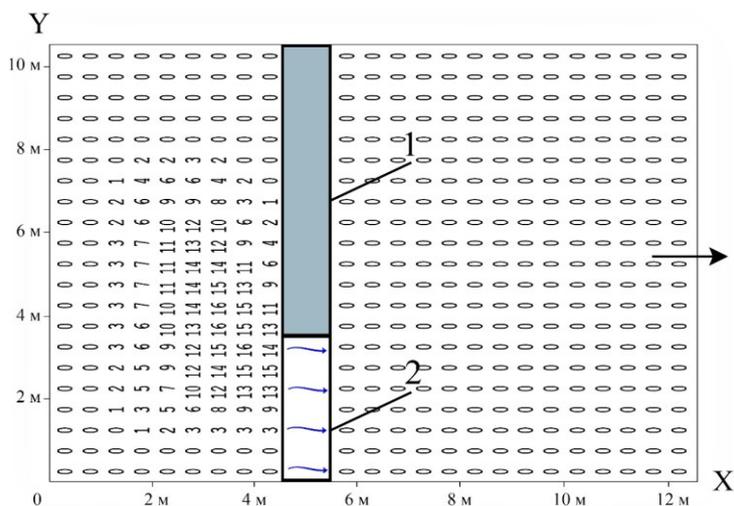


Рисунок 4.37 – Концентрація кислоти $C \cdot 10^{-1} \text{ г/м}^3$ (система «проникний бар'єр + непроникний бар'єр», сценарій № 2), $t=8,2$ год:
1 – непроникний бар'єр ; 2 – проникний бар'єр

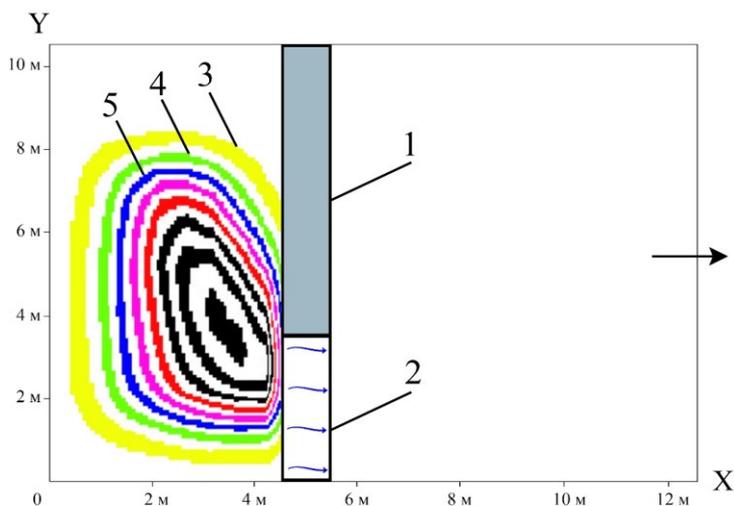


Рисунок 4.38 – Ізолінії концентрації кислоти (система «проникний бар'єр + непроникний бар'єр», сценарій № 2), $t=8,2$ год: 1 – непроникний бар'єр;
2 – проникний бар'єр; 3 – $C=16,3 \text{ г/л}$; 4 – $C=38,0 \text{ г/л}$; 5 – $C=59,8 \text{ г/л}$

Як можна бачити з рис. 4.36, при використанні лише непроникного (тобто «недосконалого») бар'єру формується шлейф забрудненої підземної води, що «обходить» бар'єр зі сторони водотриву та продовжує рух у зону, де планується розташування свердловини. Картина забруднення аналогічна сценарію, що

показаний на рис. 4.15 (проникний бар'єр, що не доходить до водотриву). Але, якщо проаналізувати дані на рис. 4.37, рис.4.38, то можна бачити, що використання системи «проникний бар'єр + непроникний бар'єр» дає можливість ефективно здійснити захист майбутньої свердловини системи дренажу від забруднення.

Слід відзначити, що час розрахунку задачі на базі розробленої чисельної моделі дорівнює 2 с.

4.3 Моделювання процесу заморожування ділянки підземних вод

Для аналізу ефективності процесу заморожування підземних вод потрібно визначати динаміку зміни температури з часом у водоносному шарі та процес формування льоду всередині підземного потоку при роботі спеціального (заморожуючого) елемента. Таким чином, необхідним є послідовне вирішення двох задач:

1. На кожному часовому кроці здійснювати розв'язок задачі гідродинаміки, тобто постійно розраховувати поле швидкості в підземному водоносному горизонті. Це пов'язано з тим, що поява льоду в підземному потоці призводить до зміни області руху підземних вод, відповідно змінюється внутрішня геометрія розрахункової області, оскільки лід – це непроникна «стінка», що формується в потоці. Формування такої «стінки» призводить до розвороту підземного потоку та перерозподілу швидкостей в зоні дослідження.

2. Здійснювати розв'язок задачі теплопереносу в області, що змінює свою геометрію з часом, оскільки в підземному потоці починається нестационарний процес зменшення температури підземних вод та, з часом, формується лід, тобто з'являються області, де відсутня течія потоку.

Далі розглядаються результати параметричних розрахунків по оцінюванню форми, розмірів зони заморожування підземних вод для різних варіантів розташування заморожуючого елемента у водоносному горизонті. Для розв'язання задачі гідродинаміки (профільна задача) використовується модель потенціального руху. Довжина розрахункової області 12 м, ширина 10,5 м; початкова температура ґрунтових вод $T=+8$ °С, температура заморожуючого

елементу $T = -99$ °C; швидкість потоку $0,000002$ м/с; коефіцієнт температуропровідності $0,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Значенню $Y=0$ відповідає поверхня водотриву. Результати обчислювального експерименту наводяться у двох виглядах:

1. У вигляді матриці розподілу температури в області дослідження для певного моменту часу.

2. У вигляді матриці, що умовно показує положення льоду в області дослідження для певного моменту часу; на цій матриці положення льоду фіксується маркером «4». Використання такого підходу дає можливість швидко аналізувати зміну внутрішньої геометрії області внаслідок формування ділянок (контрольних елементів), що містять лід.

Метою досліджень був аналіз можливості розробленої чисельної моделі здійснювати розв'язання задачі гідродинаміки та теплопереносу при різному розташуванні заморожуючого елемента у водоносному горизонті, що формує різні області розташування льоду. Тобто, аналізувалася «стійкість» розробленої чисельної моделі та її робочий діапазон.

Результати параметричних досліджень наведено нижче на рисунках. На рис. 4.39 показано область дослідження (початкове значення температури для моменту часу $t=0$ год) для першого сценарію – вертикальний заморожуючий елемент.

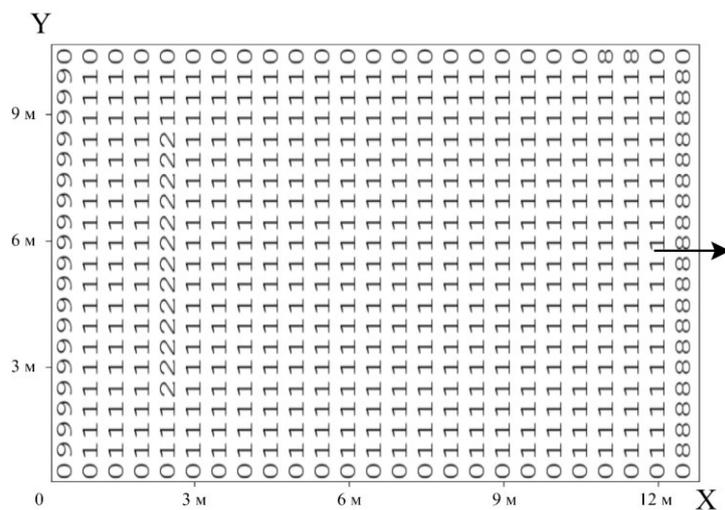


Рисунок 4.39 – Схема розрахункової області (сценарій № 1): маркер «2» – заморожуючий елемент; маркер «1» – область руху підземних вод

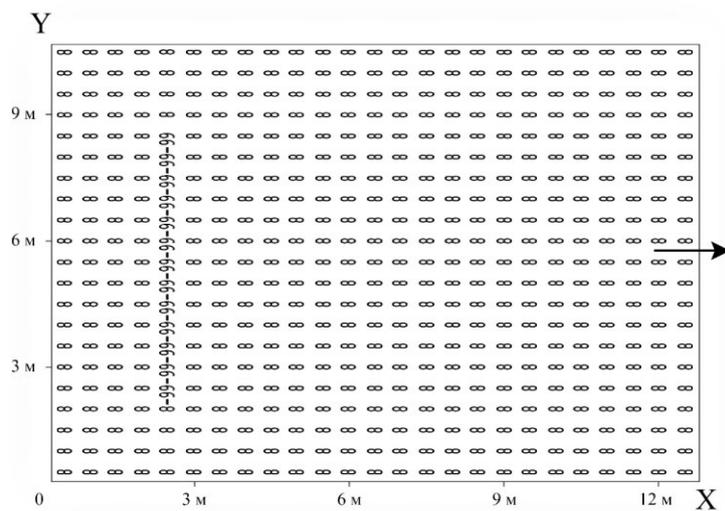


Рисунок 4.40 – Поле температури, °С в підземному потоці на момент часу $t=0$ год (сценарій № 1)

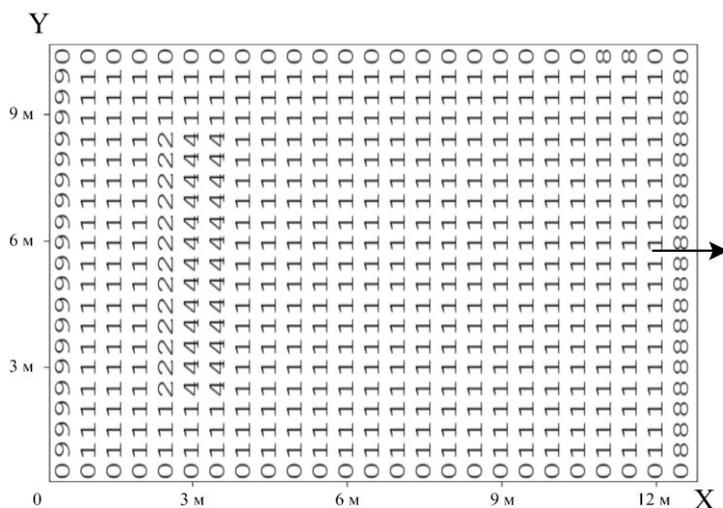


Рисунок 4.41 – Матриця розподілу льоду в області дослідження, $t=35.2$ год (сценарій № 1): маркер «2» – заморожуючий елемент; маркер «4» – лід; маркер «1» – область течії

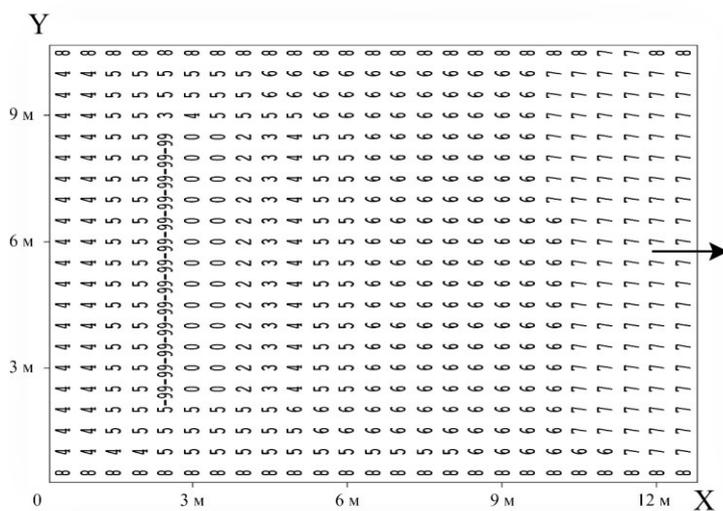


Рисунок 4.42 – Поле температури, °C в підземному потоці на момент часу $t=35,2$ год (сценарій № 1)

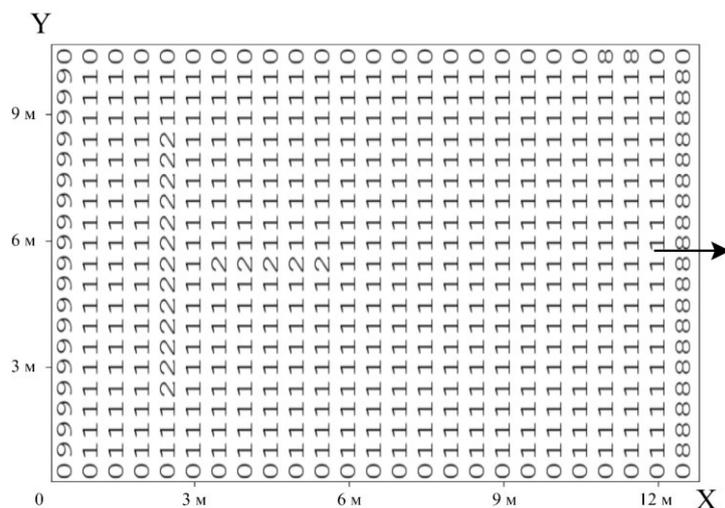


Рисунок 4.44 – Схема розрахункової області (сценарій № 2): маркер «2» – заморозуючий елемент; маркер «1» – область руху підземних вод

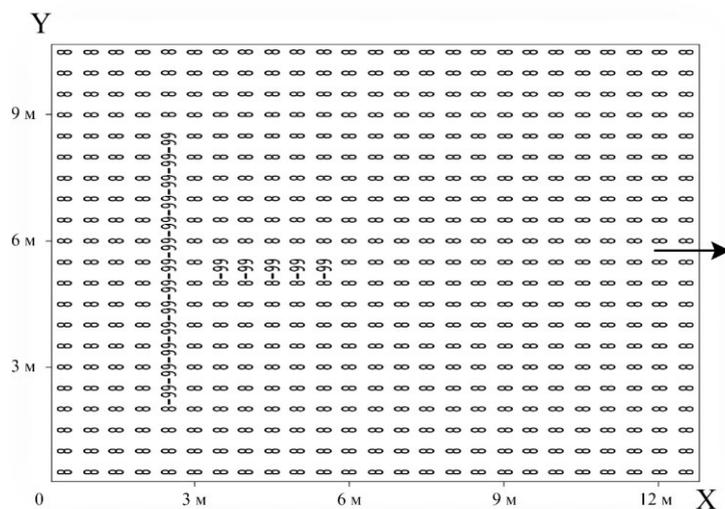


Рисунок 4.45 – Поле температури, °С в підземному потоці на момент часу $t=0$ год (сценарій № 2)

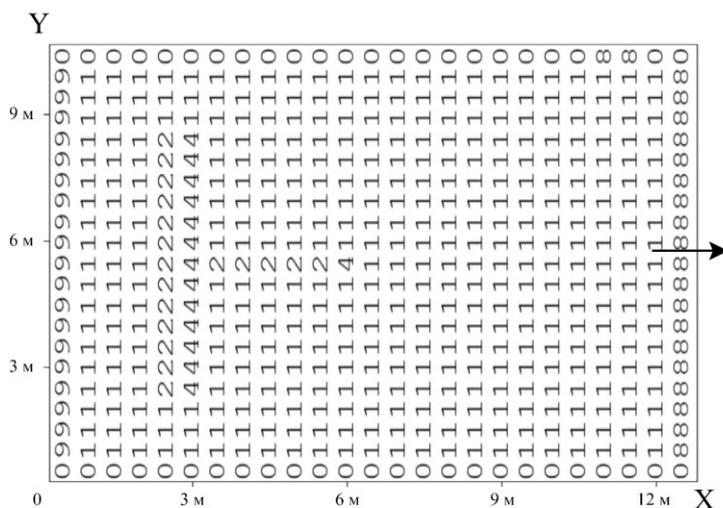


Рисунок 4.46 – Матриця розподілу льоду в області дослідження, $t=13,2$ год (сценарій № 2): маркер «2» – заморожуючий елемент; маркер «4» – лід; маркер «1» – область течії

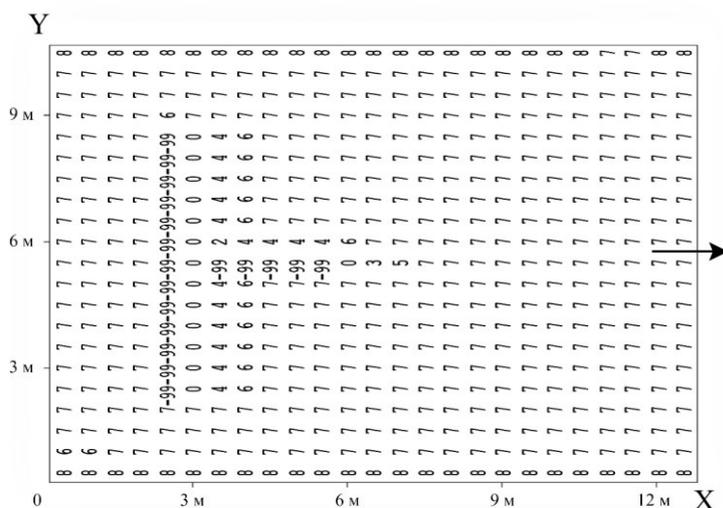


Рисунок 4.47 – Поле температури, °C в підземному потоці на момент часу $t=13,2$ год (сценарій № 2)

Аналізуючи дані, що наведено на рис. 4.45-4.47 (сценарій № 2) можна визначити таку закономірність – формування льоду відбувається в напрямку руху підземних вод; формування льоду на бічних сторонах горизонтального заморожуючого елемента для моменту часу $t=13,2$ год не спостерігається.

Далі на рисунках показано область дослідження та результати моделювання процесу заморожування підземних вод для сценарію № 3 – «вертикальний заморожуючий елемент + заморожуючий елемент Г-подібної форми». Таким чином, моделюється «складне» розташування в просторі заморожуючих елементів.

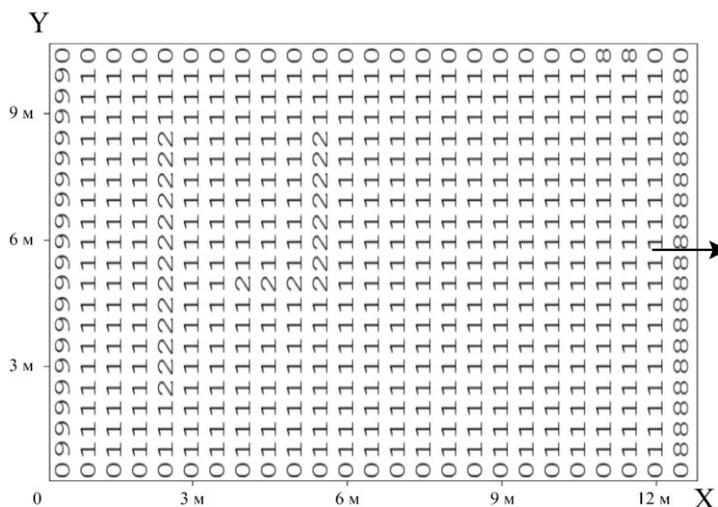


Рисунок 4.48 – Схема розрахункової області (сценарій № 3): маркер «2» – заморожуючий елемент; маркер «1» – область руху підземних вод

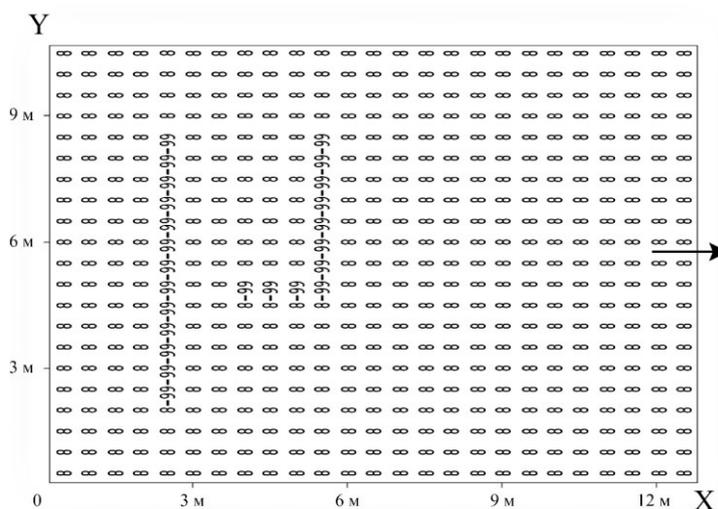


Рисунок 4.49 – Поле температури, °С в підземному потоці на момент часу $t=0$ (сценарій № 3)

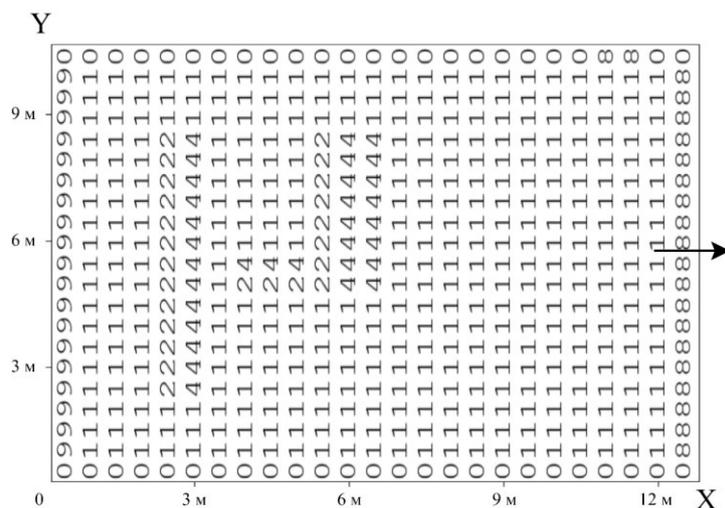


Рисунок 4.52 – Матриця розподілу льоду в області дослідження, $t=36.3$ год (сценарій № 3): маркер «2» – заморожуючий елемент; маркер «4» – лід; маркер «1» – область течії

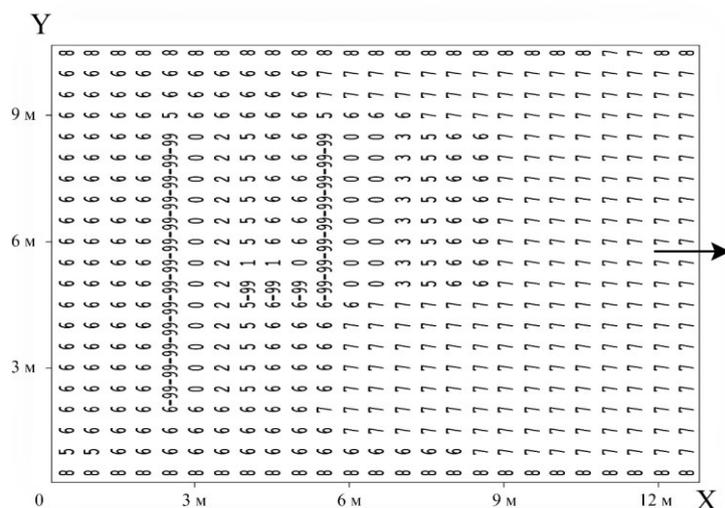


Рисунок 4.53 – Поле температури, °C в підземному потоці на момент часу $t=36,3$ год (сценарій № 3)

Аналізуючи дані, що наведено на рис. 4.49-4.53 (сценарій № 3) слід відзначити таку закономірність – формування льоду активно розвивається в горизонтальному напрямку, а не в поперечному. Це пояснюється вкладом конвекції у зміну температурного поля в потоці ґрунтових вод.

Далі на рисунках показано область дослідження та результати моделювання процесу заморожування підземних вод для сценарію № 4 – «два вертикальні заморожуючі елементи». Таким чином, моделюється «класичне» розташування в просторі заморожуючих елементів.

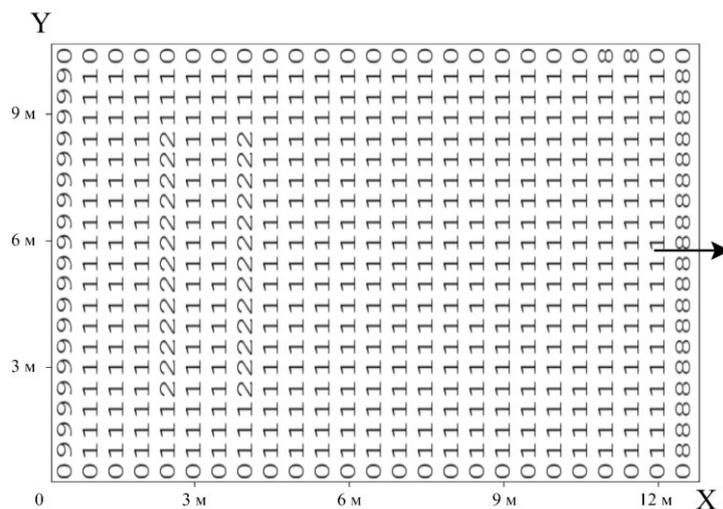


Рисунок 4.54 – Схема розрахункової області (сценарій № 4): маркер «2» – заморожуючий елемент; маркер «1» – область руху підземних вод

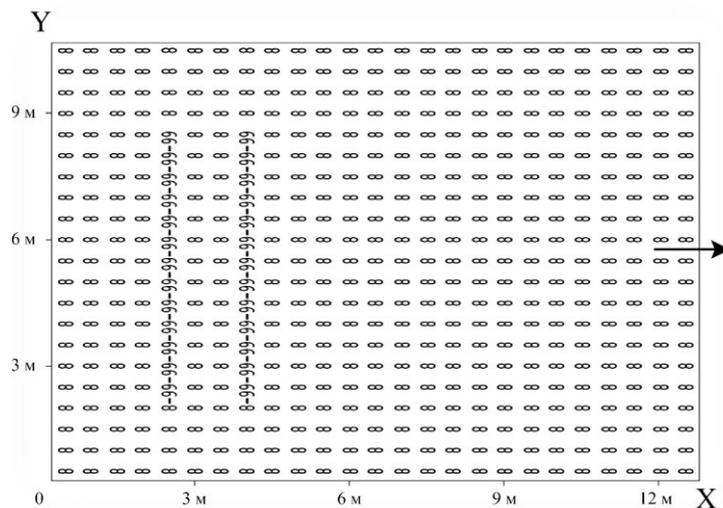


Рисунок 4.55 – Поле температури, °С в підземному потоці на момент часу $t=0$ (сценарій № 4)

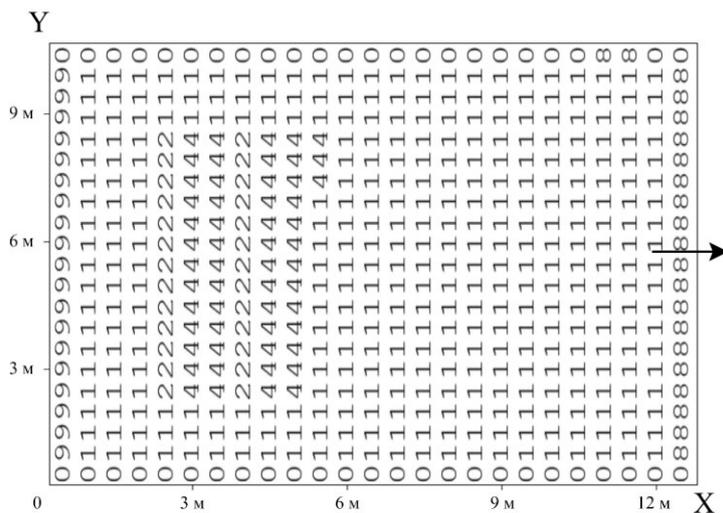


Рисунок 4.58 – Матриця розподілу льоду в області дослідження, $t=62,6$ год (сценарій № 4): маркер «2» – заморожуючий елемент; маркер «4» – лід; маркер «1» – область течії

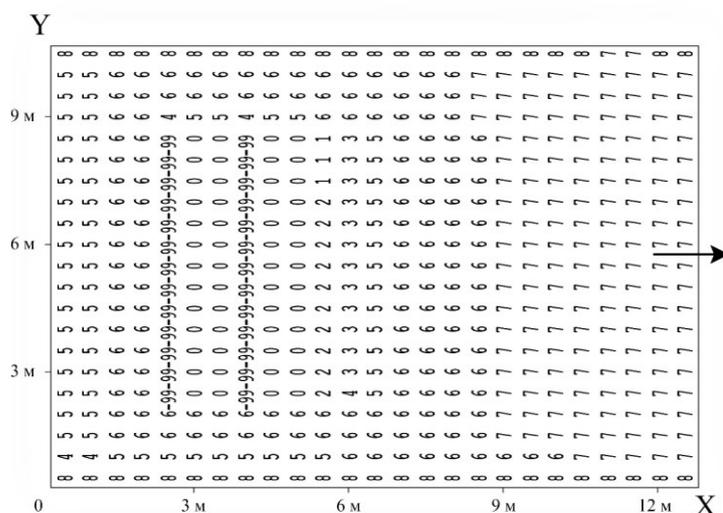


Рисунок 4.59 – Поле температури, °C в підземному потоці на момент часу $t=62,6$ год (сценарій № 4)

Аналізуючи дані, що наведено на рис. 4.55-4.59 (сценарій № 4) можна визначити таку закономірність – формування льоду активно розвивається в горизонтальному напрямку, на моменту часу $t=62,6$ год простір між двома заморожуючими елементами вже заповнене льодом.

Слід відзначити, що час розрахунку кожного сценарію складає 2 с.

4.4 Моделювання роботи дренажних свердловин на підтопленій території при наявності забудови

Розглядається задача по визначенню можливих зон суфозії при роботі дренажної системи на підтопленій, селітебній території (рис. 4.60). Обчислювальний експеримент проводився для ділянки підтопленої території біля б. Свидовок, Павлоградський район, Дніпропетровська область (рис. 4.61).



Рисунок 4.60 – Балка Свидовок: 1 – накопичувач шахтних вод
(Google Image, 2025)

Нижче наведено результати параметричних досліджень по аналізу впливу роботи дренажних свердловин на появу процесу суфозії в області дослідження.

При проведенні досліджень змінювалися наступні параметри:

1. Кількість дренажних свердловин.
2. Місце розташування дренажних свердловин.
3. Рівень ґрунтових вод в дренажній свердловині.

Мета розрахунків – аналіз робочого діапазону розробленої чисельної моделі динаміки ґрунтових вод при роботі дренажу.

Далі на рис. 4.61, 4.62 наведено схеми розташування дренажних свердловин для перших двох сценаріїв. Місце розташування свердловин показано на цих рисунках як «біле коло».

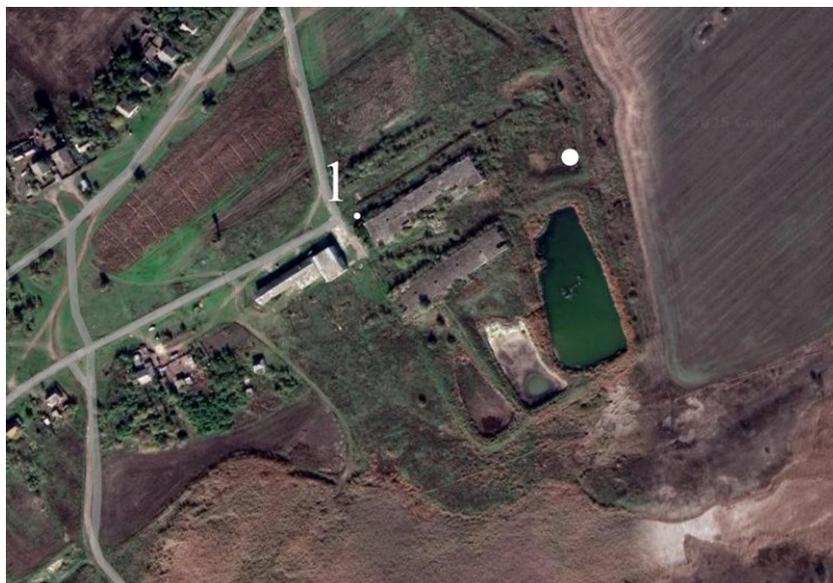


Рисунок 4.61 – Схема розташування свердловини (Сценарій № 1):

1 – реперна точка (Google Image, 2025)

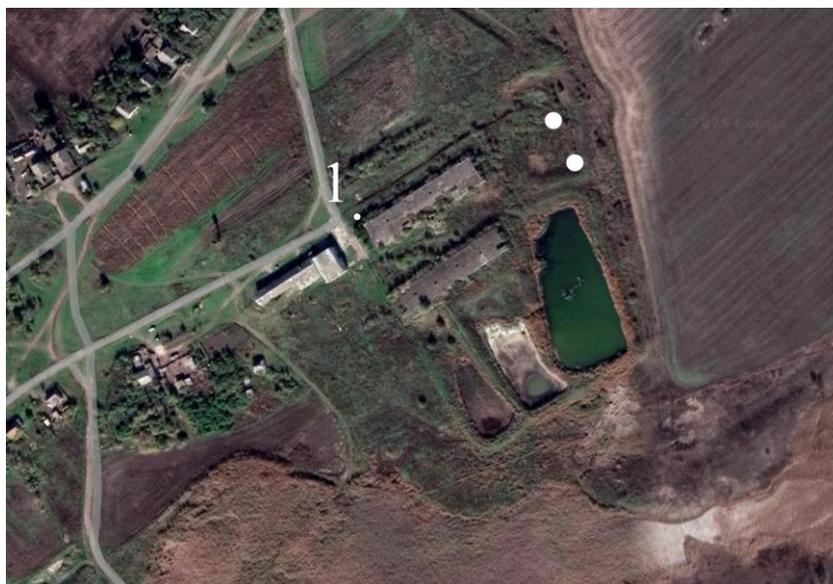


Рисунок 4.62 – Схема розташування свердловин (Сценарій № 2):

1 – реперна точка (Google Image, 2025)

Розв'язання задачі фільтрації, тобто чисельне інтегрування рівняння (2.13), при роботі дренажної свердловини, здійснювалось при наступних даних:

- 1) розміри розрахункової області 600 м × 400 м;
- 2) глибина потоку на початку розрахункової області 13 м;
- 3) глибина потоку в кінці розрахункової області 12 м;
- 4) коефіцієнт фільтрації 0,018 см/с;
- 5) порозність 0,32;
- 6) нестача насичення 1.

Відомо, що для визначення критичної швидкості, при якій починається суфозія, потрібно провести експериментальні дослідження для конкретної ділянки в області моделювання. В даному випадку, для розрахунку критичної швидкості суфозії застосовувалася залежність (2.16) та використовувалися наступні дані [41]: $d_{\max}^c = 0,00797$ см; $\rho_g = 1,8$ г/см³; $\rho_b = 1$ г/см³; $\theta = 75^\circ$; $\eta = 17,5$. При «пілотних» розрахунках можна використовувати існуючі літературні дані для отримання прогнозних даних стосовно параметрів, що використовуються для розрахунку критичної швидкості.

Результати розрахунку на базі розробленої чисельної моделі показано нижче на рисунках. Для зручності аналізу моделювання на рисунках наведено матриці, що показують глибину потоку ґрунтових вод, на яких додатково показано області, де може бути суфозія (маркер «99»). Таким чином, при аналізі наведених результатів обчислювальних експериментів слід звертати увагу на ті ділянки, де розташований маркер «99».

При проведенні обчислювальних експериментів в якості «реперної» точки вибрана точка біля першого будинку на відстані 60 м від нього (рис. 4.61 та рис. 4.62, позиція «1»). Ставилася вимога: забезпечити в цій точці рівень ґрунтових вод $H = 11,5$ м. Такий же «граничний» рівень приймався на бічних сторонах біля кожного фундаменту. Якщо ця вимога біля фундаменту виконується, то вплив фундаментів на гідродинаміку підземних вод вже не враховується при рішення

задачі фільтрації в умовах роботи дренажу та здійснюється перехід до розрахункової області другого типу (п. 3.2).

Такий підхід дає можливість швидко оцінити ефективність роботи дренажу для сценаріїв, що розглядаються. Слід відзначити, що на вході в область дослідження рівень ґрунтових вод дорівнює 13 м, глибина потоку в кінці розрахункової області 12 м.

Схема розташування дренажної свердловини (рівень ґрунтових вод у дренажній свердловині 7 м, маркер «червоне коло») для сценарію № 1 показано на рис. 4.63. Рівень ґрунтових вод для цього сценарію та області, де виникає суфозія, показана на рис. 4.64 (768 год). Слід відзначити, що друк результатів моделювання здійснено за форматом «INTEGER», тобто, на друк виводиться лише ціла частина числа, проте, при необхідності, значення може друкуватись повністю.

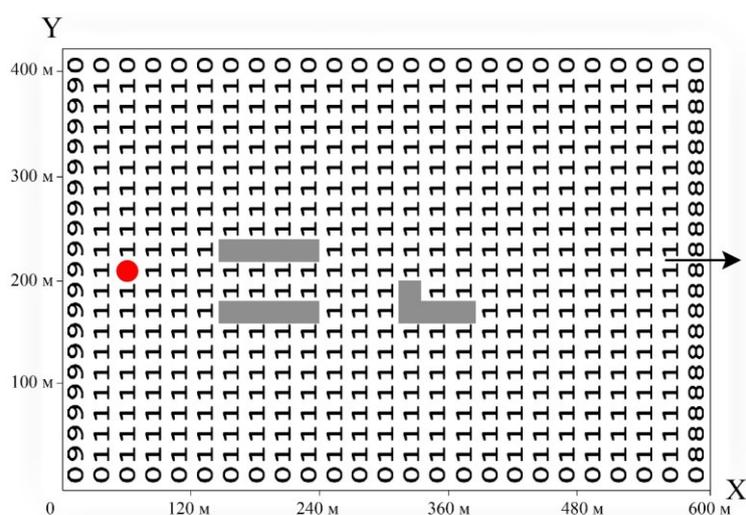


Рисунок 4.63 – Схема розрахункової області (сценарій № 1): маркер «червоне коло» – дренажна свердловина; маркер «1» – область руху підземних вод

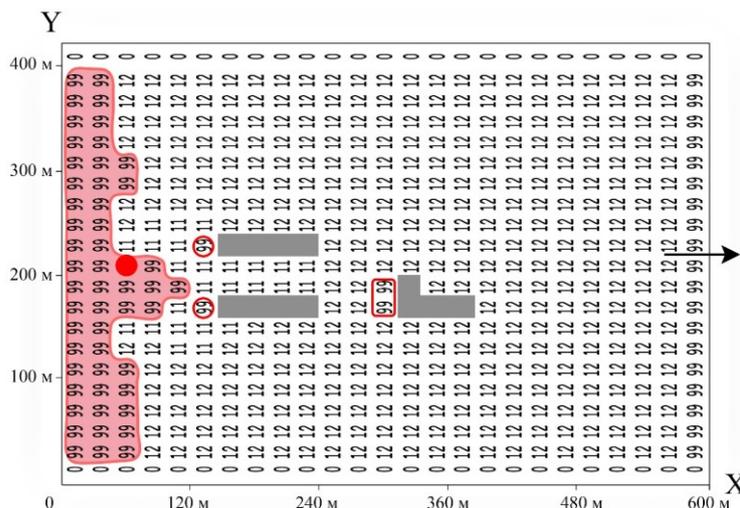


Рисунок 4.64 – Рівень ґрунтових вод, м та області виникнення суфозії – маркер «99» (сценарій № 1)

Аналіз даних обчислювального експерименту для сценарію № 1 показує, що в області дослідження можна виділити 2 області, де формується суфозія:

1. Область перед будинками.
2. Область на вході в розрахункову область, де «працює» дренажна свердловина.

Глибина ґрунтових вод в «реперній» точці дорівнює 12,08 м, тобто, при сценарії № 1 не досягається зниження рівня ґрунтових вод до необхідного рівня.

Далі на рис. 4.65 показано схему розташування дренажних свердловин (рівень ґрунтових вод у кожній дренажній свердловині 7 м, маркер «червоне коло») для сценарію № 2. Рівень ґрунтових вод для цього сценарію та області, де виникає суфозія, показано на рис. 4.66.

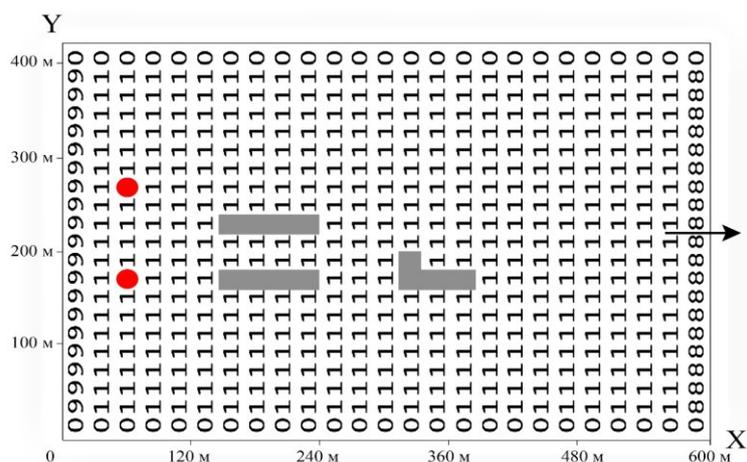


Рисунок 4.65 – Схема розрахункової області (сценарій № 2): маркер «червоне коло» – дренажна свердловина; маркер «1» – область руху підземних вод



Рисунок 4.66 – Рівень ґрунтових вод, м та області виникнення суфозії – маркер «99» (сценарій № 2)

Аналіз даних обчислювального експерименту для сценарію № 2 показує, що розміри області суфозії на початку розрахункової області значно збільшилась, що обумовлено впливом двох дренажних свердловин. Слід зробити акцент на наступному факті: при близькому розташування дренажних свердловин формується гідродинаміка з лініями току, що мають складну геометричну форму. Відомо, що чисельні моделі можуть втрачати стійкість при таких умовах. Але для розробленої чисельної моделі втрата стійкості відсутня, що є дуже важливою

рисуою для чисельною моделі. Це є очевидною перевагою розробленої чисельної моделі.

Для сценарію № 2 можна виділити такі області, де формується суфозія:

1. Область перед будинками.
2. Область на вході в розрахункову область, область де «працюють» дренажні свердловини.

Глибина ґрунтових вод в «реперній» точці дорівнює 11,65 м, тобто, при сценарії № 2 практично досягається зниження рівня ґрунтових вод до потрібного.

Слід відзначити, що для розглянутого часу роботи дренажної системи зміни розрахункової області з першого типу до розрахункової області другого типу не відбулося, тобто рівень ґрунтових вод біля фундаментів будинків на досягає «бажаної» глибини 11.5 м. Тому на приведених матрицях існують «сірі» зони – положення фундаментів.

Далі, на рис. 4.67 показана схема розташування дренажних свердловин (дві свердловини) для сценарію № 3. Рівень ґрунтових вод у кожній дренажній свердловині інший – 9 м.

Рівень ґрунтових вод для цього сценарію, області та місця виникнення суфозії, показано на рис. 4.68 та рис. 4.69; дані наведено для моменту часу 947 год.

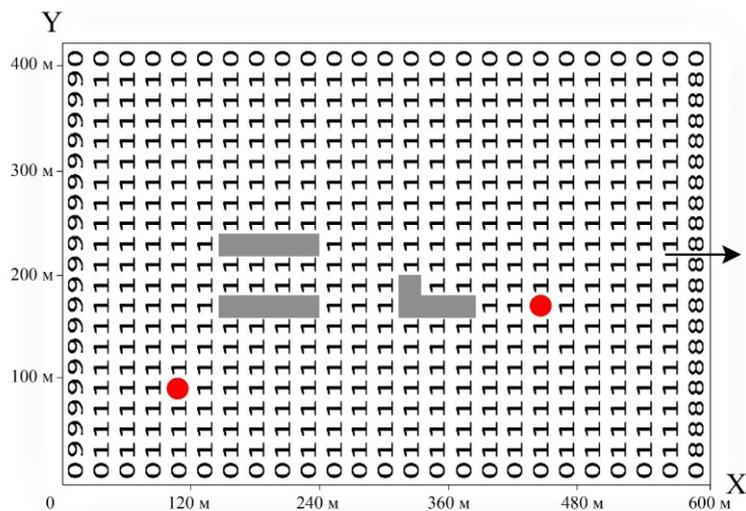


Рисунок 4.67 – Схема розрахункової області (сценарій № 3): маркер «червоне коло» – дренажна свердловина; маркер «1» – область руху підземних вод; «сіра» зона -положення фундаментів

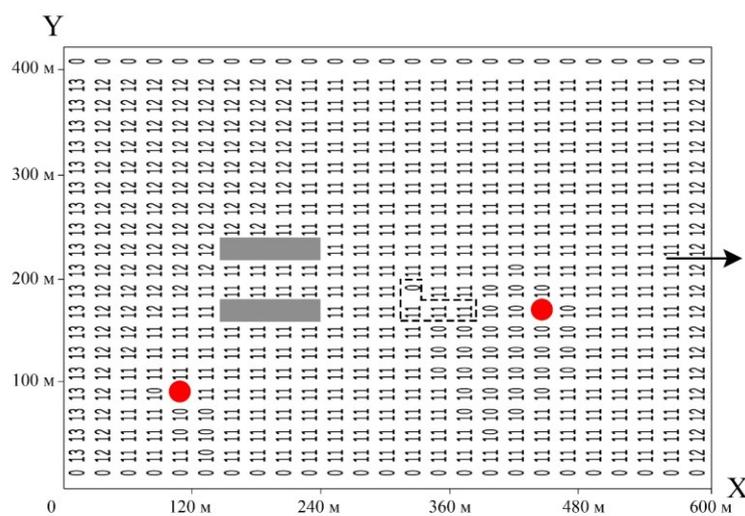


Рисунок 4.68 – Рівень ґрунтових вод, м (сценарій № 3): «штрихова» область – це зона, де вже немає контакту фундаменту з ґрунтовими водами

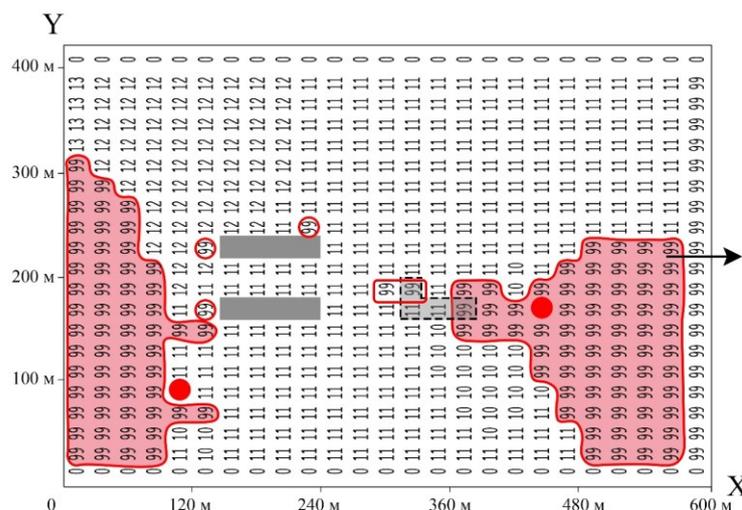


Рисунок 4.69 – Области виникнення суфозії – маркер «99» (сценарій № 3)

Аналіз даних обчислювального експерименту для сценарію № 3 показує, що для розглянутого моменту часу відбувся перехід розрахункової області з першого типу до розрахункової області другого типу (рис. 4.68). А саме – біля третього будинку, що мав Г-подібну форму, відбулось зниження рівняння ґрунтових вод до відмітки 11.5 м по всьому периметру фундаменту, за виключенням той частини фундаменту, де є маркер «0». Тобто, побудована чисельна модель дає можливість визначати конкретні ділянки біля фундаментів, де є зниження рівня ґрунтових вод до бажаної величини, а де його немає.

Відзначимо, що глибина ґрунтових вод в «реперній» точці дорівнює 11,15 м, тобто, при сценарії № 3 рівень ґрунтових вод менший за необхідний.

Час розрахунку одного сценарію складає 1 с. Таким чином, розроблена чисельна модель дає можливість швидко отримати прогностні дані щодо визначення областей, де можлива поява суфозії при роботі дренажних свердловин. Крім цього, важливим є те, що результати обчислювального експерименту наводяться у вигляді, що дозволяють швидко та наглядно аналізувати результати обчислювального експерименту.

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто практичне використання побудованих чисельних моделей на прикладі розв'язання комплексу задач, що виникають при розробці проектів дренажу для підтоплених територій.

2. Результати, що отримано на базі розроблених моделей, свідчать про те, що вони дозволяють швидко визначати базові параметри, необхідні для обґрунтування інженерних рішень при розробці проектів дренажу на підтоплених територіях.

3. Представлені в розділі результати дають змогу зробити висновок, що розроблені чисельні моделі фільтрації, геоміграції, теплопереносу дають змогу враховувати низку важливих фізичних факторів, що впливають на процес динаміки підземних вод, при цьому для їх застосування потрібна стандартна геологічна інформація.

4. Розроблені моделі дають можливість, на етапі проектування дренажу, заздалегідь визначати області можливого виникнення суфозія. Важливо підкреслити, що результати обчислювального експерименту представлено у вигляді, що дозволяє «побачити» ділянки, де може виникнути суфозія. Це дає можливість оперативно вносити зміни до проекту з метою усунення цього негативного явища.

5. Використання побудованих чисельних моделей дає можливість швидко визначити ефективність використання проникного бар'єру, його необхідні розміри та місце розташування у підземному потоці.

6. Параметричні дослідження, що було проведено на базі побудованих чисельних моделей, підтверджують їх високу ефективність та широкий робочий діапазон.

7. Важливою особливістю побудованих моделей є швидкість розрахунку на комп'ютерах малої та середньої потужності, що є важливим для їхнього широкого використання під час проведення проектних робіт по створенню системи дренажу на підтоплених територіях.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором результати, які в сукупності вирішують науково-практичну задачу з оцінки ефективності низки інженерних заходів, що реалізуються при проектуванні систем дренажу на підтоплених територіях.

Виконані в роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Проведено критичний аналіз методів розрахунку динаміки підземних вод, результати якого свідчать про те, що на практиці, при проектуванні дренажу на підтоплених територіях, поширеним є використання емпіричних та аналітичних моделей, що мають ряд суттєвих обмежень. Зокрема, емпіричні моделі не дають поле глибин підземного потоку в області, де проектується дренаж, та не враховують можливість появи суфозії при роботі дренажу.

2. Виконано огляд наукових публікацій, який показав, що для використання відомих комерційних пакетів програм, типу MODFLOW, необхідним є значна кількість детальної гідрологічної інформації, яка, на певних етапах розробки проектів дренажу, може бути відсутня. Тому виникає потреба у швидкорозрахункових математичних моделях класу «operational models» для розв'язання певних гідрологічних задач на базі обмеженої вхідної інформації.

3. Розроблено чисельну модель для дослідження динаміки підземних вод при роботі дренажу, яка ґрунтується на застосуванні рівняння фільтрації безнапірного потоку підземних вод та дозволяє досліджувати динаміку ґрунтових вод з визначенням областей можливої суфозія при роботі дренажу.

4. Розроблено чисельні моделі для дослідження процесів гідродинаміки та теплопереносу в підземних водах при формуванні тимчасового бар'єру на підтоплених територіях шляхом заморожування окремих ділянок підземного потоку. Дані моделі дають можливість визначати час формування області заморожування, розміри цієї області, її форму практично без обмеження на розташування заморожуючих елементів.

5. Розроблено чисельні моделі гідродинаміки та масопереносу в підземних водах для дослідження ефективності використання проникного бар'єру з метою

захисту дренажної свердловини від забруднення. Дані моделі дають можливість науково-обґрунтовано визначати місце розташування та розміри проникного бар'єру.

6. Науково-обґрунтовано використання системи «проникний бар'єр + непроникний бар'єр» для захисту дренажної свердловини від потрапляння агресивної домішки. Використання такої системи дає можливість змінювати гідродинаміку руху підземного потоку біля неї та ефективно використовувати нейтралізуючі речовини для зменшення кількості агресивної домішки в потоці.

7. Проведено експериментальні та теоретичні дослідження, що підтвердили адекватність розроблених чисельних моделей.

8. Розроблені CFD моделі та створені на їх основі коди використовуються у філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця» при виконанні робіт, які пов'язані з проектуванням дренажних систем підземних захисних споруд цивільного захисту АТ «Укрзалізниця».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабіцька О. А. Ефективність систем інженерного захисту від підтоплення самопливного та примусового типу та напрями їх удосконалення: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 06.01.02 «Сільськогосподарські меліорації». Київ, 2010. 21 с.
2. Басок Б. І., Авраменко А. О., Резакова Т. А., Морозов Ю. П. Процеси фільтрації геотермального теплоносія в пористому шарі. Промислова теплотехніка. 2009. Т. 31, № 5. С. 69-75.
3. Білецький В. С. Моделювання у нафтогазовій інженерії: навчальний посібник. Львів: Видавництво "Новий Світ – 2000", – Харків: НТУ «ХПІ», 2021. 306 с. ISBN 978-617-7519-90-3.
4. Біляєв М. М., Коваленко А. С., **Козачина В. В.**, Скуратов М. О., Чірков А. О. Математичне моделювання динаміки водних потоків. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 12-13 грудня 2024 р.). Д.: УДУНТ, 2024. С. 112.
5. Біляєв М. М., **Козачина В. В.** Моделювання гідродинаміки ґрунтових вод на підтоплених територіях. Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 2 (014). С. 36–41. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.36.928>
6. Біляєв, М. М., **Козачина В. В.** Моделювання нестационарного процесу масопереносу в підземних водах. Наука та прогрес транспорту. 2024. № 2 (106). С. 18–25. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/305701>.
7. Біляєв М. М., **Козачина В. В.** Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах. Наука та прогрес транспорту. 2024. Вип. 3(107). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/313664>.
8. Біляєв М. М., **Козачина В. В.** Чисельне моделювання роботи дренажу на підтоплених територіях. Тези доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 23-24 травня 2024 р.). С. 182-183.
9. Біляєв М. М., **Козачина В. В.**, Гунько О. Ю., Кузнецов В. М., Звонарьова О. В. (2025). Математичне моделювання процесу нейтралізації

агресивної домішки у підземних водах: експрес модель. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. Вип. 4(112). С. 27–33. <https://doi.org/10.15802/stp2025/346941>.

10. Біляєв М. М., **Козачина В. В.**, Коваленко А. С., Чірков А. О., Чирва М. В. Математичне моделювання процесів масопереносу та гідродинаміки. Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». 1-3 листопада 2023 року м. Дніпро, Україна. Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет».

11. Біляєв М. М., Козачина В. А., **Козачина В. В.** Чисельне моделювання процесів гідродинаміки. XIV International scientific and practical conference «Solving Scientific Problems Using Innovative Concepts» (March 13-15, 2024) Copenhagen, Denmark. International Scientific Unity, 2024. P. 182-184.

12. Біляєв М. М., Козачина В. В., Матусевич М. О., Савченко Д. В. **Чисельне моделювання нестационарних процесів геоміграції та теплопереноса.** Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XIX Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 18-19 грудня 2025 р.). – Д.: УДУНТ, 2025. – 172 с.

13. Бомба А. Я., Булавацький В. М., Скопецький В. В. Нелінійні математичні моделі процесів геогідродинаміки. К.: Наук. думка, 2007. 300 с.

14. Бочевєр Ф. М., Орадовська А.Є. Гідрогеологічне обґрунтування захисту підземних вод та водозаборів від забруднення. К.: Надра, 1972. 129с.

15. Бубнова, О. А., Мірошник, В. А., Маркуль, Р. В., Машихіна, П.Б., & Берлов, О. В. Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах: прикладні аспекти. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. 3(111). С. 14-20. <https://doi.org/10.15802/stp2025/338071>.

16. Бугай Д. О., Заноз Б. Ю., Лаврова Т. В., Кориченський К. О., Кубко Ю. І., Авіла Р., Рець Ю. М. Розвиток системи моніторингу підземних вод у зоні впливу об'єктів спадщини уранового виробництва Придніпровського хімічного заводу. *Геологічний журнал*. 2021. № 4. С. 56-70.

17. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. – Вип. 21 / відповідальний редактор Е. С. Малкін. – Київ: КНУБА, 2017. – 107 с.
18. Воропай Г. В. Наукові засади розвитку дренажних систем в умовах зміни клімату : Доктор технічних наук : спец.. 06.01.02 - Сільськогосподарські меліорації. Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України. Київ, 2025. 453 с.
19. Грановська Л. М., Жужа П. В. Теоретичне обґрунтування інженерних заходів з боротьби зі шкідливою дією вод на території смт Нова Маячка Цюрупинського району Херсонської області // Зрошуване землеробство. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. Херсон: Грінь Д.С., 2015. Вип. 64. С. 79-82
20. ДБН В 1.1-25:2009 «Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення».
21. Державна програма запобігання і боротьби з підтопленням земель, затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 29.04.2004 р. № 545. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/545-2004-%D0%BF?find=1&text=%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%84#Text>
22. ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016 Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення
23. Заноз Б. Ю., Бугай Д. О. Визначення параметрів водообміну і моделювання геофільтраційних процесів в зоні впливу уранового хвостосховища «Західне» Придніпровського хімічного заводу. «Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України». 2023. Том. 16 (1). С. 98-110. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.291210>.
24. Згуровський М. З., Скопечкий В. В., Хрущ В. К., Біляев М. М. Чисельне моделювання поширення забруднення в навколишньому середовищі. К.: Наукова думка, 1997. 368 с

25. Інженерний захист територій: Навч. посібник; за ред. А.М. Рокочинського, Л.А. Волкової, В.А. Живиці, В.П. Чіпака. –Херсон: ОЛДІ ПЛЮС, 2017. – 414 с.
26. Каленчук-Порханова А. О., Тульчинський В. Г. Математичне моделювання екологічного стану природних об'єктів навколишнього середовища. Вісник Національної академії наук України. 2021. № 11. С. 43-54.
27. Качмар Ю. Д., Цьомко В. В., Бабій М. Б. Математичне моделювання продуктивності нафтових свердловин. Нафтогазова галузь України. 2013. № 6. С. 28-32.
28. Каштан С., Бомба А. Математичне моделювання та прогнозування керованих рухів поверхневих та підземних вод. Моделювання, керування та інформаційні технології. 2025. 8. С. 295–298. <https://doi.org/10.31713/МСІТ.2025.092>
29. Ковальчук В.П. Моделювання управління рівнем ґрунтових вод в умовах дії вертикального дренажу. Меліорація і водне господарство. 2010. Вип. 98. С.105-108.
30. Ковальчук В.П. Системне дослідження та наукове обґрунтування заходів для захисту від підтоплення смт Каланчак Херсонської області. Водне господарство України, 2010. Вип.2. С. 21-25.
31. Ковальчук П.І., Пендак Н.В., Ковальчук В.П., Волошин М.М. Системна оптимізація водокористування при зрошенні: Монографія. Рівне: НУВГП, 2008. 204 с.
32. **Козачина В. В.**, Біляєв М. М., Козачина В. А. Математичне моделювання динаміки ґрунтових вод. Сучасні світові тенденції розвитку науки та інформаційних технологій : Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 30–31 травня 2024 р.). ГО «Інститут інноваційної освіти»; Науково-навчальний центр прикладної інформатики НАН України. Запоріжжя: АА Тандем, 2024. С. 83-85.
33. **Козачина В. В.**, Коваленко А. С., Чірков А. О., Біляєв М. М. Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасопереносу. Наука і сталий розвиток транспорту 2024. Т.І: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф.

студентів і молодих учених, Дніпро, 27 листоп. 2024р. Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 207-208.

34. **Козачина В. В.**, Матусевич М. О., Біляєв М. М. Математичні моделі якості води. Наука і сталий розвиток транспорту 2025. Т. I: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 листоп. 2025р. Дніпро: УДУНТ, 2025. С. 238-239

35. **Козачина В. В.**, Чирва М. В., Коваленко А. С., Біляєв М. М., Машихіна П. Б. Математичні моделі в задачах гідродинаміки та масопереносу. Наука і сталий розвиток транспорту 2023: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 жовт. 2023 р.: у 3 т. Дніпро : УДУНТ, 2023. Т. I. С. 103-104.

36. Котикович І. В. Розроблення системи захисту слабодренуваних територій від підтоплення: дис. канд. техн. наук : 06.01.02. Нац. акад. аграр. наук України, Ін-т вод. проблем і меліорації. Київ, 2021. 176 с.

37. Кошляков О. Є. Гідрогеологічне моделювання : Підручник. К.: ВПЦ “Київський університет”, 2003. 113 с.

38. Левицька В. Д. Удосконалення технології забору води у системах протифільтраційного захисту територій від підтоплень з водосховищ (на прикладі Кам'янської протифільтраційної завіси):: дис. канд. техн. наук : 192: Інститут водних проблем і меліорації Національної Академії аграрних наук України. Київ, 2022. 343 с.

39. Лобода Н. С. Отченаш Н. Д. Підземні води, їх забруднення та вплив на навколишнє середовище: навчальний посібник. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2017. 199 с.

40. Малєєв В. О., Безпальченко В. М., Ананійчук О. О. Підтоплення територій Херсонської області: аналіз та шляхи вирішення проблеми. Проблеми екології та енергозбереження. Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції, 20–22 вересня 2019. Миколаїв, 2019. С. 176–179.

41. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної та контрольної роботи з навчальної дисципліни «Інженерна літоєкологія міст» (для студентів 5 курсу денної і 5-6 курсу заочної форм навчання спеціальності

7.04010601, 8.04010601 «Екологія та охорона навколишнього середовища») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: К. Д. Бригінець, Д. В. Дядін. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 19 с.

42. Морозов Ю. П. Видобування геотермальної енергії: монографія. Київ: ІВЕ, 2022. 245 с. ISBN 978-966-641-12.

43. Олійник О. Я., Поляков В. Л. Дренаж перезвожених земель. Київ: Наукова думка, 1987. 280 с.

44. Пивовар М. Г., Бугай М. Г. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления. НАНУ, Институт гидромеханики. Киев, 2000. 332 с.

45. Поляков В. Л. Расчет установившейся безнапорной фильтрации к систематическому дренажу при водообмене с сопредельными средами. Проблемы водопостачання, водовідведення та гідраліки. 2016. Вип. 27. С. 291-301.

46. Поляков, В. (2024). Теоретичне обґрунтування регулярної системи горизонтальних дрен (новий підхід). Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (6), 40–48. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2023.06.040>

47. Проектування міських територій: підручник: [у 2 ч.] / [за ред. І. Е. Линник, О. В. Завального] ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. Ч. 2. 544 с.

48. Пшинько О. М., Біляєв М. М., Калашніков І. В. Еколого-гідрогеологічне обґрунтування природоохоронних заходів при ліквідації наслідків аварійних розливів: монографія. Д.: Нова ідеологія, 2012. 173 с.

49. Ричак Н.Л., Кізілова Н.М. Математичне моделювання динаміки водних екосистем і можливостей їх самоочищення за умовами глобальних змін клімату. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», випуск 54, 2022. С. 44-50.

50. Рудаков Д. В. Математичні моделі в охороні навколишнього середовища: Навчальний посібник. Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2004. 160 с. ISBN 996-551-143-2.

51. Савчук Д., Беліков О., Котикович І. Підтоплення та системи захисту від нього в зоні дніпровських водосховищ // Водне господарство України. 2014. № 5 (113). С. 27-32.
52. Савчук Д. П., Харламов О. І., Котикович І. В. Досвід захисту сільських населених пунктів від підтоплення у зоні зрошення. Наукові горизонти. 2019. № 5. С. 95–104.
53. Савчук Д. П., Шевченко А. М., Малюга В. В. Процеси підтоплення та дренажу сільських територій у лісостеповій зоні. Меліорація і водне господарство. 2013. Вип. 100(1). С. 120-131.
54. Сай В. М. Дослідження процесу підтоплення земель з врахуванням соціально-економічних збитків. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2011. Вип. 75. С. 127-132.
55. Сандраков Г. В., Ляшко С. І., Семенов В. В. Моделювання процесів фільтрації для неоднорідних середовищ та осереднення. Кібернетика та системний аналіз. 2023. Т. 59, № 2. С. 42–63. doi: <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00556-4>
56. Сєдін В. Л., Грабовець О. М. Поширення підтоплення на території України. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2018. № 5. С. 24-31.
57. Тугай А.М., Олійник О.Я., Тугай Я.А., Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу. Харків: ХНАМГ, 2004. 240 с
58. Хлапук М. М. Теоретичні основи фільтрації в середовищах, що деформуються, та їх застосування в області дренажу: Автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.23.16. Рівне: Рівнен. держ. техн. ун-т., 1999. 34 с.
59. Хоружий П. Д., Крученюк В. Д. Дослідження притоку води до дренажних свердловин // Водне господарство України. 2004. Вип. 3-4. С. 8-12.
60. Хоружий П.Д., Крученюк В.Д. Способи підвищення ефективності протифільтраційних завіс від підтоплення територій з водосховищ // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. 2003. Вип. 6. С. 48-51.

61. Хоружий П.Д., Левицька В.Д. Конструкції споруд та технології захисту територій від підтоплення дренажними водами з водосховищ. Аграрна наука виробництву: 2018. № 4. С. 25-26
62. Шестопалов В. М., Руденко Ю. Ф. Гідрогеоecологічні проблеми Солотвинського родовища кам'яної солі і їх аналіз з використанням моделювання (Україна). «Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України». 2021. Том. 14 (2). С. 111-128. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245937>
63. Alseno K. Mosai, Heidi Richards, Hlanganani Tutu. Modelling The Transport Of Pollutants From Mine Dump And Landfill Sites To Groundwater And Surface Water. IMWA 2022, Christchurch, New Zealand, 6–10 November 2022, p. 273-279.
64. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the American Institute of Mechanical Engineers. 1942. Vol. 146. P. 54–67.
65. Beltrán-Vargas D., García-Páez F., Martínez-Morales M., Rentería-Guevara S. A. Novel Numerical Modeling of a Groundwater Level-Lowering Approach Implemented in the Construction of High-Rise/Complex Buildings. *Water*. 2025; 17(5):732. 28 p. <https://doi.org/10.3390/w17050732>
66. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V., Yakubovska Z. CFD Modeling of Traffic-related Air Pollution in Street Canyon. Transport Means 2024 : Proc. of the 28th Intern. Sci. Conf. (Oct. 02–04, 2024, Kaunas, Lithuania). Kaunas University of Technology [et al.]. Kaunas, 2024. P. 120–125. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P120-125>
67. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V., Mashykhina P., Semenenko P. Analysis of Air Dust Pollution in the Transport Compartment of the Launch Vehicle at the Stage of the Pre-launch Preparation. Transport Means 2024 : Proc. of the 28th Intern. Sci. Conf. (Oct. 02–04, 2024, Kaunas, Lithuania). Kaunas University of Technology [et al.]. Kaunas, 2024. P. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P299-304>.

68. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P., Kozachyna V., Brazaluk I., Klym V., Tatarko L. Development of a Method for Assessing Air Dustiness in the Main Fairing of the Launch Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, № 1 (119). P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013>.
69. Biliaiev M. M., **Kozachyna V. V.** Modeling Ground Waters Dynamics and Pollution. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2024. No. 2 (020). P. 137–143. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.137.1052>.
70. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Kirichenko P. S., **Kozachyna V. V.**, Kaidash M. D. Numerical Modeling of Groundwater Dynamics and Heat and Mass Transfer Processes. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2024. No. 6 (024). P. 135–143. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.271224.135.1121>.
71. Biliaieva V., Levchenko L., Myshchenko I., Tykhenko O., Kozachyna V. Modeling the Distribution of Emergency Release Products at a Nuclear Power Plant Unit. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, No. 2. P. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.03>.
72. Bomba Andrii, Tkachuk Mykola, Havryliuk Volodymyr, Kyrysha Ruslan, Gerasimov Ievgenii, Pinchuk Oleg. Mathematical modelling of filtration processes in drainage systems using conformal mapping. *Journal of Water and Land Development*. 2018. Vol. 39. P. 11-15. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0054>
73. Bubnova O. A., Miroshnyk V. A., Markul R. V., Mashykhina P. B., Tatarko L. H. Mathematical Modeling of Filtration and Geomigration Under Conditions of Anthropogenic Load. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 2. С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/330858>
74. Carniato Luca, Schoups Gerrit, Seuntjens P., Bastiaens Leen. (2010). Modeling Fe⁰ permeable reactive barriers for groundwater remediation. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12, EGU General Assembly 2010, held 2-7 May, 2010 in Vienna, Austria, p.6009

75. Chiang Wen-Hsing, Kinzelbach Wolfgang. (1998). Processing MODFLOW—a Simulation System for Modelling Groundwater Flow and Pollution. Hamburg, Zürich. 342 p.
76. Clausnitzer Volker, Mirnyy Vladimir. Modeling groundwater and heat flow subject to freezing and thawing. IMWA 2016. Mining Meets Water – Conflicts and Solutions. P. 1150-1153
77. Fetter C. W. Contaminant hydrogeology. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall; 1999. 500 p.
78. Fie A., Skladziewski J. (1997). FEM Solution Of The Ground Freezing Problem With Flowing Groundwater. WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol. 18 (Moving Boundaries IV). P. 57-66. <https://doi.org/10.2495/MB970061>
79. King, A., Jensen, V., Fogg, G.E. & Harter, T. Groundwater Remediation and Management for Nitrate. Technical Report 5 in: Addressing Nitrate in California's Drinking Water with a Focus on Tulare Lake Basin and Salinas Valley Groundwater. Report for the State Water Resources Control Board Report to the Legislature. Center for Watershed Sciences, University of California, Davis. 2012. 51 p.
80. Liu Z, Sun Y, Wang B, Li Q. Experimental Study of Artificial Ground Freezing by Natural Cold Gas Injection. *Applied Sciences*. 2020; 10(17):6055. 13 p. <https://doi.org/10.3390/app10176055>
81. Marty Antoine, Biamino Laurent, Jourdan Georges, Daniel Eric, Massoni Jacques, Houas L., Leriche D. (2019). Experimental and Numerical Investigation of a Shock Wave Propagation Through a Bifurcation. 31st International Symposium on Shock Waves 1, Nagoya, Japan. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91020-8_87.
82. Mauro Alessandro, Normino Gennaro, Cavuoto Filippo, Marotta Pasquale, Massarotti Nicola. Modeling Artificial Ground Freezing for Construction of Two Tunnels of a Metro Station in Napoli (Italy). *Energies*. 2020. 13(5). 1272. 24 p. <https://doi.org/10.3390/en13051272>.
83. Medvedieva, O. O., Dziuba, S. V., Tiutkin, O. L., Mashykhina, P. B., & Berlov, O. V. Modeling of filtration and geomigration under anthropogenic impact on

groundwater. *Science and Transport Progress*. (2025). 3(111). P. 21–28.
<https://doi.org/10.15802/stp2025/338077>

84. Nikolaev Petr, Jivkov Andrey, Margetts Lee, Sedighi Majid. Modelling artificial ground freezing subjected to high velocity seepage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, Volume 221, 18 p,
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125084>

85. Persson Joakim, Andersson Niklas. Modeling groundwater flow and PFOS transport. Degree Project №. 2016:06. KTH Royal Institute Of Technology, Stockholm, Sweden. 2016. 98 p.

86. Pietrzak Damian. (2021). Modeling migration of organic pollutants in groundwater — Review of available software. *Environmental Modelling & Software*. 144. 105145. [10.1016/j.envsoft.2021.105145](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105145).

87. Pimentel E., Sres A., Anagnostou G. (2007). Modelling of ground freezing in tunnelling. *Underground space : the 4th dimension of metropolises : proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress, Prague, Czech Republic, 5-10 May 2007*. P. 331-336. <https://www.doi.org/10.1201/NOE0415408073.ch56>.

88. Preene M., Roberts T. O. L., Powrie W., Dyer M. R. (2000). *Groundwater Control – Design and Practice*. Construction Industry Research and Information Association, CIRIA Report C515, London.

89. Rudakov D. V., Rudakov V. C. Analytical Modeling of Aquifer Pollution Caused by Solid Waste Depositories. *Groundwater*. 1999. 37. P. 352-357.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1999.tb01111.x>

90. Rudakov D. V., Sadovenko I. A., Inkin A. V., Yakubovskaya Z. N. Modeling of heat transport in an aquifer during accumulation and extraction of thermal energy. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2012. 1. 40-45.

91. Safonyk Andrii, Bomba Andrii. Mathematical modeling process of liquid filtration taking into account reverse influence of process characteristics on medium characteristics. *International Journal of Applied Mathematics Research*. 2015. Vol. 1. P. 1-7. <https://www.doi.org/10.14419/ijamr.v4i1.3805>.

92. Sharifa Said Shinoon Al Hashmi. Numerical simulation of groundwater flow and nitrate transport in Wadi Samail catchment : PhD Thesis. Oman : Sultan Qaboos University, 2020, 116 p.

93. Shen Chonghui, McKinzie Billy, Arbabi Sepehr. (2010). A Reservoir Simulation Model for Ground Freezing Process. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Florence, Italy, 19–22 September 2010. 8 p. <https://www.doi.org/10.2118/132418-MS>.

94. Smart P., Herbertson J.G. Drainage Design. Springer Science & Business Media, 2013. 299 p.

95. Sopko Joseph. Coupled Heat Transfer and Groundwater Flow Models for Ground Freezing Design and Analysis in Construction. Conference Proceedings: Geotechnical Frontiers, 2017. P. 719-729. <https://doi.org/10.1061/9780784480472.076>.

96. Taheri Tizro Abdollah, Sarhadi Behzad, Mohamadi, Mohamad. (2018). MODFLOW/MT3DMS Based Modeling Leachate Pollution Transfer in Solid Waste Disposal of Bahar Plain Deep Aquifer. Iranian Journal of Health Sciences. <https://doi.org/10.18502/jhs.v6i2.46>.

97. Telyma, S. (2018). Calculations of the systematic vertical drainage under protection of the irrigated lands and the built-up territories from the ground waters submergence. Environmental Safety and Natural Resources, 27(3), 49–58. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.3.49-58>

98. Telyma, Serhii & Voloshkina, Olena & Bereznytska, Yuliia & Efimenko, Volodymyr. (2020). Modeling of the riverside groundwater intakes exploitation taking into account of the stream flow changes. Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects 2020. P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo084>.

99. Telyma, S., Voloshkina, O., Kovalova, A. & Bereznytska, Y. (2023). Optimization of the building process of ground water intakes under the conditions of natural water resources deficits. Construction of Optimized Energy Potential, 12(1), 2023. 41-50. <https://doi.org/10.17512/bozpe.2023.12.05>

100. Telyma, S., Voloshkina, O., Zhukova O., Sipakov R. Modeling of Pollution Spreading Problems on Irrigated Lands. World Environmental and Water Resources Congress 2023. P. 493-508. <https://doi.org/10.1061/9780784484852.048>.

101. Tkachenko, Tatiana & Kravchenko, Maryna & Voloshkina, Olena & Mileikovskiy, Viktor & Tkachenko, Oleksii & Sipakov, Rostyslav. (2024). Evaluating Rain-Garden Bands: Filtration Properties and Implications for Urban Water Management. World Environmental and Water Resources Congress 2024. P. 960-968. <https://doi.org/10.1061/9780784485477.085>.

102. Tkachenko, Tetiana & Voloshkina, Olena & Mileikovskiy, Viktor & Sipakov, Rostyslav & Hlushchenko, Roman & Tkachenko, Oleksii. (2023). Using Rain-Garden Bands for Rainwater Drainage from Roads. World Environmental and Water Resources Congress 2023. P. 1207-1214. <https://doi.org/10.1061/9780784484852.110>.

103. Tiutkin O. L., Bubnova J. A., Markul R. V., Miroshnyk V. A., Mashykhina P. B. Modeling the Dynamics of Groundwater in Applied Problems. Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture. 2025. No. 4(028). P. 165–171. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.165.1185>.

104. Zehraa B. Masood, Ziad Tark Abd Ali. Numerical modeling of two-dimensional simulation of groundwater protection from lead using different sorbents in permeable barriers. Environ. Eng. Res. 2020, vol. 25 (4), pp. 605–613. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.237>

105. Zio Souleymane, Lamien Bernard, Beidari Mohamed, Tougri Inoussa. Numerical simulation of pollutants transport in groundwater using deep neural networks informed by physics. Gulf Journal of Mathematics. 2024. 16(2). P. 337-352. <https://doi.org/10.56947/gjom.v16i2.1863>

ДОДАТОК А

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

СТАТТІ

1. Біляєв М. М., **Козачина В. В.** Моделювання гідродинаміки ґрунтових вод на підтоплених територіях. Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 2 (014). С. 36–41. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.36.928.
2. Біляєв, М. М., **Козачина В. В.** Моделювання нестационарного процесу масопереносу в підземних водах. Наука та прогрес транспорту. 2024. № 2 (106). С. 18–25. DOI: 10.15802/stp2024/305701.
3. Біляєв М. М., **Козачина В. В.** Моделювання процесів фільтрації та тепломасопереносу в підземних водах. Наука та прогрес транспорту. 2024. Вип. 3(107). С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/313664>.
4. Біляєв М. М., **Козачина В. В.**, Гунько О. Ю., Кузнецов В. М., Звонарьова О. В. (2025). Математичне моделювання процесу нейтралізації агресивної домішки у підземних водах: експрес модель. Наука та прогрес транспорту. 2025. Вип. 4(112). С. 27–33. <https://doi.org/10.15802/stp2025/346941>.
5. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Kirichenko P. S., **Kozachyna V. V.**, Kaidash M. D. Numerical Modeling of Groundwater Dynamics and Heat and Mass Transfer Processes. Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture. 2024. No. 6 (024). P. 135–143. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.271224.135.1121>.
6. Biliaiev M. M., **Kozachyna V. V.** Modeling Ground Waters Dynamics and Pollution. Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture. 2024. No. 2 (020). P. 137–143. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260324.137.1052.

ТЕЗИ

7. Біляєв М. М., Коваленко А. С., **Козачина В. В.**, Скуратов М. О., Чірков А. О. Математичне моделювання динаміки водних потоків. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 12-13 грудня 2024 р.). Д.: УДУНТ, 2024. С. 112.

8. Біляєв М. М., Козачина В. А., **Козачина В. В.** Чисельне моделювання процесів гідродинаміки. XIV International scientific and practical conference «Solving Scientific Problems Using Innovative Concepts» (March 13-15, 2024) Copenhagen, Denmark. International Scientific Unity, 2024. P. 182-184.
9. Біляєв М. М., **Козачина В. В.** Чисельне моделювання роботи дренажу на підтоплених територіях. Тези доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 23-24 травня 2024 р.). С. 182-183.
10. Біляєв М. М., **Козачина В. В.**, Коваленко А. С., Чірков А. О., Чирва М. В. Математичне моделювання процесів масопереносу та гідродинаміки. Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». 1-3 листопада 2023 року м. Дніпро, Україна. Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет».
11. Біляєв М. М., **Козачина В. В.**, Матусевич М. О., Савченко Д. В. Чисельне моделювання нестационарних процесів геоміграції та теплопереносу. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XIX Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 18-19 грудня 2025 р.). – Д.: УДУНТ, 2025. – 172 с.
12. **Козачина В. В.**, Біляєв М. М., Козачина В. А. Математичне моделювання динаміки ґрунтових вод. Сучасні світові тенденції розвитку науки та інформаційних технологій : Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 30–31 травня 2024 р.). ГО «Інститут інноваційної освіти»; Науково-навчальний центр прикладної інформатики НАН України. Запоріжжя: АА Тандем, 2024. С. 83-85.
13. **Козачина В. В.**, Коваленко А. С., Чірков А. О., Біляєв М. М. Експериментальне та теоретичне дослідження процесів тепломасопереносу. Наука і сталий розвиток транспорту 2024. Т.І: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 листоп. 2024р. Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 207-208.

14. **Козачина В. В.**, Матусевич М. О., Біляєв М. М. Математичні моделі якості води. Наука і сталий розвиток транспорту 2025. Т. І: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 листоп. 2025р. Дніпро: УДУНТ, 2025. С. 238-239.

15. **Козачина В. В.**, Чирва М. В., Коваленко А. С., Біляєв М. М., Машихіна П. Б. Математичні моделі в задачах гідродинаміки та масопереносу. Наука і сталий розвиток транспорту 2023: зб. тез доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, Дніпро, 27 жовт. 2023 р.: у 3 т. Дніпро : УДУНТ, 2023. Т. І. С. 103-104.

ДОДАТОК Б

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Козачини Валерії Вячеславівни
у навчальний процес

Чинним актом підтверджується те, що результати дисертаційної роботи аспірантки кафедри «Гідравліка, водопостачання та фізика» Козачини В.В. використовуються в навчальному процесі Українського державного університету науки і технологій при підготовці студентів, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (ОПП «Рациональне водокористування та охорона водних ресурсів»), 183 «Технології захисту навколишнього середовища» (ОПП «Захист довкілля та техногенна безпека»). Матеріали дисертаційної роботи, алгоритми та пакети програм використовуються при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Будівництво гідротехнічних споруд», «Захист території від підтоплення», «Проектування полігонів для відходів», що дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладання матеріалу при вивченні вказаних дисциплін.

Керівник навчального відділу

Світлана БОРИЧЕВА

Зав. каф. «Гідравліка, водопостачання
та фізика» д.т.н., проф.

Микола БІЛЯЄВ

ДОДАТОК В

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора Філії «Проектно-
вишукувальний інститут
залізничного транспорту»
Акціонерного товариства
«Українська залізниця»



Калашніков І.В.

« » 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Козачини Валерії Вячеславівни

В дисертаційній роботі Козачини Валерії Вячеславівни розроблено нові чисельні моделі для рішення наступних практичних задач:

1. Розрахунок динаміки підземних вод при роботі дренажних систем різного типу та при наявності в підземних потоках різного роду перешкод.
2. Дослідження процесів геоміграції в підземних водах при дії техногенних джерел забруднення.
3. Розрахунок процесів теплопереносу в підземних водах при реалізації процесу їх заморожування.

Для моделювання гідродинаміки підземних вод та процесів тепломасопереносу в підземних водах здійснюється чисельне інтегрування фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища за допомогою кінцево-різницевого схем. На базі розроблених чисельних моделей створено спеціалізоване програмне забезпечення. Розроблені чисельні моделі дозволяють визначати раціональний режим роботи дренажних систем в умовах забудови з метою мінімізації ризику утворення механічної суфозії. Особливістю побудованих чисельних моделей є можливість розрахунку динаміки штучного заморожування підземних вод. Це дозволяє визначати раціональний режим роботи обладнання, що використовується для реалізації цієї технології.

Побудовані моделі мають значні переваги перед існуючими методами розрахунку, що використовуються на даний час при практичному вирішенні задач дренажу підземних вод та вирішенні процесів тепломасопереносу.

Розроблені моделі та пакети для програм використано в філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця» при виконанні робіт, які пов'язані з проектуванням дренажних систем підземних захисних споруд цивільного захисту АТ «Укрзалізниця».

Заслужений інженер
(посада)



(підпис)
ХАРКІВСЬКЕ
ВІДДІЛЕННЯ
(підпис)

В.В. Божко
(ПІБ)

гол. інж.
(посада)

С.В. Шепелюк
(ПІБ)