

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

Кафедра Гідравліка та водопостачання

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
на здобуття кваліфікаційного ступеня «магістр»

Галузь знань 19 Архітектура та будівництво

Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія

Спеціалізація Водопостачання та водовідведення

Тема Моделювання забруднення підземних вод при аварійних розливах на  
залізничній станції Кільчень

Керівник магістерської роботи      доц. Гунько О.Ю.

Студент      Мартинов Євген Вікторович

Дніпро  
2020 р.

## **Зміст пояснювальної записки**

Анотація

Розділ 1 Забруднення джерел водопостачання

Розділ 2 Моделювання забруднення ґрунтових вод

Розділ 3 Побудова розрахункових залежностей

Розділ 4 Експериментальне дослідження

Розділ 5 Обчислювальний експеримент

Розділ 6 Економічні розрахунки.

Висновки

Список використаних джерел

## **Анотація**

У випадку надзвичайних ситуацій на залізнице трапляється виток різних речовин. Внаслідок цього має місце інтенсивне забруднення зони аерації та ґрунтових вод. Для практики потрібно мати математичні моделі, які дозволяли би визначати динаміку формування зон забруднення в підземних водах. Таки моделі дають можливість прогнозувати вплив аварійних розливів на стан водного середовища та оцінювати ефективність різноманитних захисних засобів. Розглядається процес забруднення підземних вод на залізничній станції Кільчень.

**Мета роботи** - розробка чисельної моделі для прогнозу динаміки забруднення підземних вод на залізничній станції Кільчень.

**Об'єкт дослідження** – процес поширення домішки у підземних водах на залізничній станції Кільчень.

**Предмет дослідження** - забруднення підземних вод внаслідок аварії біля залізничної станції Кільчень.

**Методи дослідження** – математичне моделювання.

**Практичне значення** - розроблена ефективна модель для оцінці процесу забруднення підземних вод при аварійних розливах на залізнице.

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

## **Annotation**

In case of emergencies, there is various substances leak on the railway. As a result, there is intense pollution of the aeration zone and groundwater. For practice it is necessary to have mathematical models that would determine the dynamics of the formation of pollution zones in groundwater. Such models make it possible to predict the impact of accidental spills on the state of the environment and to assess the effectiveness of various protective equipment. The process of groundwater pollution at the Kilchen railway station is considered.

**Purpose** - development of a numerical model for forecasting the dynamics of pollution of underground waters at the Kilchen railway station.

**The object of study** - the process of pollutant transfer near the underground waters at the Kilchen railway station.

The subject of research is pollution of underground waters during the emergencies Kilchen railway station.

**Research methods** - mathematical model.

**The practical significance** - an effective model for assessing the process of ground waters pollution during emergency bottling at the Kilchen railway station.

**Keywords** - emergency spilling, underground waters pollution, calculating experiment.

## **Розділ 1**

### **Забруднення джерел водопостачання**

Забруднення джерел водопостачання — зміна їх хімічного складу або поява інших небажаних компонентів в результаті діяльності людини (рис.1.1.). Це може бути наслідком порушення санітарних норм в приповерхневих умовах

(створення водовідстійників, поява стічних вод, зберігання сміття, техновідходів), порушення режиму підземних вод внаслідок неграмотно організованого буріння, ліквідації існуючого ґрунтово-рослинного шару, порушення зони аерації, водоупорної покрівлі.

Основними причинами забруднення підземних вод є діяльність промисловості (37 %), сільського господарства (16 %), житлово-комунального господарства (10 %), надходження некондиційних підземних вод при порушенні режиму експлуатації водозаборів (13 %).

Основними джерелами забруднення підземних вод є:

- місця збереження і транспортування промислової продукції і відходів в-ва;
- місця акумуляції комунальних і побутових відходів;
- с/г та інші угіддя, на яких застосовуються добрива, пестициди та інші хімічні речовини;
- забруднені ділянки поверхневих водних об'єктів, що живлять підземні води;
- забрудненні ділянки водоносного горизонту, природно чи штучно зв'язані з суміжними водоносними горизонтами;
- ділянки інфільтрації забруднених атмосферних опадів;
- промислові площадки підприємств, поля фільтрації, бурові скважини та інші горні виробки.

Виділяють: мікробіологічне і хімічне забруднення підземних вод. В підземних умовах деякі бактерії і віруси зберігають життєздатність, деякі навіть до 100 діб і більше. Зони забруднень утворюється при наявності полів асенізації і фільтрації, тваринницьких дворів, через які йде пряма фільтрація забруднених вод.

Забруднення підземних вод хімічними речовинами може йти через забруднення поверхневих вод, що живлять підземні (рис.1.1).



Рисунок 1.1 Забруднення джерела водопостачання

(<http://dvplace.ru/blogs/dialektika-sushego/samye-zagrjaznenye-reki-v-mire.html>)

Забруднення ПАР може йти через поповнення запасів підземних вод із поверхневих джерел води, що містять ПАР. При забрудненні або небезпеці забруднення підземних вод об'єм і спосіб спостережень за їх режимом і якістю визначається в залежності від значення і виду водокористування , а також з врахуванням можливих наслідків забруднень.

Причини забруднення поверхневих вод:

- скидання в водойми неочищених або недостатньо очищених стічних вод промислових підприємств, комунальним і сільським господарствам;
- залишки добрив та отрутохімікати ,що змиваються талими та дощовими водами.
- виробництво і широке застосування ПАР, особливо в складі миючих засобів обумовлює поступлення їх з стічними водами в багато водойм в тому числі в джерела господарсько-побутового забезпечення.

Основна небезпека забруднення підземних вод - не безповоротність використання.. За фізичним станом забруднення розділяють : нерозчинні,

колоїдні, розчинні. За природою: мінеральні, органічні, бактеріальні, біологічні. Мінеральні - пісок, глинисті частинки, мін. солі, розчини кислот, лугів, та ін.

Органічні домішки - 1) рослини :залишки рослин (овочів, злаків, росл.масло).

2)тваринні: фізіол. виділ. тварин і людини, залишки тканин тварин та ін.

Бактеріальне і біологічне забруднення - побутові стічні води і стоки деяких промислів підприємств (шкіряні заводи, фабрики первина обробка шерсті, хутряні виробництва, біофабрикати, п-ства мікробіологічної промисловості)

Забруднюючі речовини, потрапляючи в природні водойми, призводять до якісних змін води, що в основному виявляються в змінах фізичних властивостей її хімічного складу, зокрема, появі неприємних запахів, присмаків і т.д.; у наявності речовин, що плавають на поверхні води і відкладанні на дні водойм. Забрудненні природні водойма стаються джерелом забруднення підземних вод. Виробничі стічні води забруднені в основному відходами і викидами виробництва. Кількісна і якісна сполука їх різноманітна і залежить від галузі промисловості, її технологічних процесів; їх поділяють на дві основні групи: ті, що утримують неорганічні домішки, у тому числі і токсичні, і ті, що утримують отрути.

До першої групи відносяться стічні води содових, сульфатних, азотно-тукових заводів, збагачувальних фабрик свинцевих, цинкових, нікелевих руд і т.д., у яких містяться кислоти, луки, іони важких металів і ін. Стічні води цієї групи в основному змінюють фізичні властивості води.

Стічні води другої групи скидають нафтопереробні, нафтохімічні заводи, підприємства органічного синтезу, коксохімічні й ін. У стоках містяться різні нафтопродукти, аміак, альдегіди, смоли, феноли й інші шкідливі речовини. Шкідлива дія стічних вод цієї групи полягає головним чином в окисних процесах, внаслідок яких зменшується вміст у воді кисню, збільшується біохімічна потреба в ньому, погіршуються органолептичні показники води.

Нафта і нафтопродукти на сучасному етапі є основними забруднювачами внутрішніх водойм, вод і морів Світового океану. Потрапляючи у водойми,

вони створюють різні форми забруднення: нафтову плівку, що плаває на воді, розчинені чи емульсовані у воді нафтопродукти, що осіли на дно, важкі фракції і т.д. При цьому змінюється запах, смак, забарвлення, поверхневий натяг, в'язкість води, зменшується вміст кисню, з'являються шкідливі органічні речовини, вода здобуває токсичні властивості і становить загрозу не тільки для людини. 12 мл нафти роблять непридатною для вживання тонну води.

Серед продуктів промислового виробництва особливе місце за своїм негативним впливом на водне середовище і живі організми займають токсичні синтетичні речовини. Вони знаходять все більш широке застосування в промисловості, на транспорті, у комунально-побутовому господарстві. Концентрація цих з'єднань у стічних водах, як правило, складає 5-Ю мг/л при ГДК- 0,1 мг/л. Ці речовини можуть утворювати у водоймах прошарок піни, особливо добре помітний на порогах, перехрестах, шлюзах. Спроможність до піноутворення у цих речовин з'являється вже при концентрації 1-2 мг/л.

Через господарську діяльність людини триває інтенсивне забруднення підземних вод. Найбільш забруднені ділянки знаходяться переважно біля великих промислових та сільськогосподарських об'єктів, а також населених пунктів. Найбільші порушення — в економічно розвинутих районах Дніпропетровської та Запорізької областей з високим рівнем розвитку промисловості, сільського господарства та великою густотою населення. Головними джерелами забруднення є накопичувачі промислових та побутових рідких і твердих відходів, мінералізовані шахтні та рудникові води, мінеральні добрива та отрутохімікати, накопичувачі відходів на тваринницьких комплексах і фермах.

У межах басейну Дніпра розташовано близько 1000 фільтруючих накопичувачів, 80% яких сконцентровано в південній частині басейну. Сумарний обсяг зібраних у них високомінералізованих вод досягає 1 км<sup>3</sup>, з них 77% припадає на Дніпропетровську область. З накопичувачів до



підземних водоносних горизонтів переходять розчини солей, нафтопродукти, ароматичні речовини тощо. Так, надзвичайно складна екологічна ситуація склалася у районах міст Узина, із загальною площею забруднення нафтопродуктами близько 100 км<sup>3</sup>, Білої Церкви, де під загрозою існування опинився дендрологічний парк «Олександрія».

У гірничодобувних районах Дніпропетровської, Запорізької, Донецької та Полтавської областей до підземних горизонтів регулярно надходять високомінералізовані дренажні, рудникові та шахтні води. Так, загальна площа забруднення підземних вод у районі Кривбасу становить близько 300 км<sup>3</sup>. Таким чином, у басейні Дніпра сформувалися великі осередки забруднених підземних вод, зокрема в районах:

- ДніпропетровськаДніпродзержинська — стічними водами об'єктів хімічної і металургійної промисловості;
- НовомосковськаПавлограда — шахтними водами і відходами тваринницьких комплексів;
- Кривого Рога — шахтними водами та стічними водами металургійних заводів;
- Житомира, Рівного — стічними водами підприємств хімічної і легкої промисловості, а також господарсько-побутовими стічними водами.

Особливо інтенсивно забруднюються підземні води в районі Лисичансько-Рубіжанського промислового вузла. Потребують очищення шахтні, кар'єрні, рудникові і дренажні води.

При забрудненні підземних вод дуже важливим є моніторинг стану водних ресурсів. Роботи з ведення моніторингу підземних вод України здійснюються відповідно до Положення про державну систему моніторингу довкілля в частині моніторингу вод та Водного кодексу України. Основною метою моніторингу підземних вод — є спостереження за станом підземних вод, як одного з найважливіших компонентів оточуючого середовища, з підготовкою необхідної інформації та прогнозів різного призначення, а також розробки науково-обґрунтованих рекомендацій для

прийняття рішень про запобігання негативним змінам режиму підземних вод та дотримання вимог екологічної безпеки.

Моніторинг підземних вод здійснюється в цілому по території України з використанням БД АІС ДВК, яка створена в ДНВП «Геоінформ України» і містить інформацію (з можливістю відбору даних по області, по водогосподарській ділянці, по басейнах підземних вод та по річкових басейнах): загальні дані по водопункту, індекс та інтервал залягання водоносного горизонту, геологічний розріз водопункту, гідрогеологічну характеристику водопункту (результати випробування: дебіт, зниження, напір, статичний рівень, коефіцієнти фільтрації, водопровідності; фільтр: тип, діаметр, інтервал установки тощо), дані спостережень за положенням рівня підземних вод, каталог хімічного складу підземних вод водопункту – загальні дані та макрокомпоненти.

Ведення моніторингу підземних вод України здійснюється на двох рівнях:

- Регіональному – в державних регіональних геологічних підприємствах по території діяльності, де опрацьовується первинна інформація, яка передається на державний рівень.
- Державному – у ДНВП «Геоінформ України», що проводить узагальнення інформації регіонального рівня, її зберігання, аналіз та обробку.

Основними задачами моніторингу підземних вод є:

- Збирання, систематизація і накопичення інформації щодо моніторингу підземних вод.
- Оцінка стану підземних вод та прогнозування змін режиму підземних вод.
- Підготовка гідрогеологічних інформацій та різнотермінових прогнозів режиму підземних вод.
- Надання інформації щодо стану підземних вод на запити центральних та місцевих органів виконавчої влади, підприємствам що використовують інформацію про стан підземних вод.

За підсумками робіт складаються:

- Щорічні інформації до Національної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні.
- Щорічні прогнози рівнів ґрунтових вод по території України, що призначені для плануючих, гідрометеорологічних, водогосподарських, сільськогосподарських та геологічних організацій; різних міністерств та відомств, що проводять водно-екологічні та еколого-геологічні дослідження, можуть використовуватись при вирішенні питань, що пов'язані з умовами формування підземних вод, взаємозв'язком підземних і поверхневих вод.
- Гідрогеологічні щорічники про стан підземних вод України, що містять узагальнену інформацію в межах адміністративних областей і басейнів підземних вод про режим підземних вод в природних і порушених умовах, якісний стан підземних вод (основні та потенційні джерела забруднення підземних вод, умови забруднення, вміст в підземних водах забруднюючих речовин, якість підземних вод на водозаборах).

Прогнози рівнів ґрунтових вод та щорічники про стан підземних вод супроводжуються схематичними картами розподілу прогнозних рівнів, щільності спостережних пунктів державного рівня та графіками суми опадів та рівнів і хімічного складу по водопунктах, які будуються на основі інформації автоматизованих баз даних.

Згідно з класифікацією Міжнародної конвенції, найбільш небезпечні скиди у воду хлорорганічних сполук, сполук ртуті, кадмію, миш'яку, міді, цинку, свинцю, нафти та нафтопродуктів, радіоактивних та побутових відходів. Всі вони характерні для об'єктів Збройних Сил України, особливо для ремонтних заводів і майстерень, парків техніки, складів та баз ПММ, військових аеродромів і т. д.

Найбільш забруднені зливові стічні води потрапляють з територій автопарків, заправочних пунктів і баз ПММ, котельних, майданчиків ремонту та обслуговування техніки, з об'єктів, на яких може мати місце забруднення ґрунту нафтопродуктами та іншими відходами шкідливих речовин<sup>^</sup>

Надходження нафтопродуктів у середовище проходить шляхом потрапляння у нього забруднених вод:

Відстоєм, який зливається з резервуарів, складів, паливо-заправників, баків; осадом, який видаляється при чищенні резервуарів; відпрацьованими маслами; розчинниками нафтового походження, які використовують при обслуговуванні техніки;

Виробничими та атмосферними стічними водами пунктів миття автотехніки, складів ПММ;

Безпосередніми виливами нафти при порушенні встановлених правил експлуатації техніки та обладнання (виливи і витоки).

Сьогодні стурбованість викликає стан резервуарного парку, баз і складів ПММ, особливо в частинах Військово-Повітряних Сил. Так перевірка показала, що 80% резервуарів, які експлуатуються, побудовані у 50-60-их роках, є ненадійними. Причому терміни технічного огляду резервуарів посадовими особами не витримуються, що не виключає можливості аварійних витоків нафти, як це трапилось в м. Умані на складі ПММ. На учбовому військовому аеродромі від постійної вібрації розійшлися шви трьох наземних резервуарів по тисячі кубометрів кожний. Гас витік у балку Сухий Яр, значно забруднивши ґрунти, підземні води, атмосферне повітря. Незадовільна ситуація склалася в гарнізонах: Узин, Умань, Старокостянтинівка, Прилуки, Озерне, Запоріжжя, Маріуполь, Біла Церква, Велика Круча, де нафтопродукти проникли у ґрунтові води.

Перелічені джерела забруднення вод у військах впливають на стан як поверхневих, так і підземних вод. Найчастіше підземні води забруднюються мікробами, які проникають в ґрунт з полів асенізації, тваринницьких господарств, вигрібних ям, сміттєзвалищ. В місцях тріщинуватих ґрунтових порід забруднення з поверхні проникає в підземні води з атмосферними опадами. Забруднення артезіанських вод трапляється через незадовільний технічний стан водогінних труб та їх з'єднань.

На сьогодні досить гостро стоїть проблема забруднення вод об'єктами Збройних Сил України. небезпечною є обстановка в місцях дислокації військових частин в м. Полтаві, Узині, Кривий Ріг, Чугуєві, Запоріжжі, Арцизі та ін. Так в м. Біла Церква в результаті незадовільного функціонування зливової каналізації та очисних споруд авіаремонтного заводу значно забруднені території парку-пам'ятки садово-паркового мистецтва XVIII ст. "Олександрія". Практично знищене озеро та джерела парку, води яких містять токсичні елементи тяжких металів (хрому, свинцю, кадмію та ін.) у концентраціях 100-200 раз перевищуючих ГДК. На поверхні вод плавають у значній кількості нафтопродукти, які досить часто самозагораються. Забруднені води стікають в річку Рось, винищуючи у ній рибу та всі живі організми.

Аналогічною є ситуація на багатьох об'єктах Військово-Повітряних Сил, в т. ч. із станом вод поблизу військових аеродромів. Так дослідження показали, що біля Полтави на території військового аеродрому підземні води виявились настільки забрудненими нафтопродуктами, що практично перетворились із вод у вибухонебезпечне нафтове озеро, яке залягає під аеродромом. Це обумовлено самовільними зливами невикористаного в польоті пального, переливами його при перекачці з резервуарів, незадовільним функціонуванням зливної каналізації авіаремонтних майстерень або її фрагментарною наявністю на території аеродрому.

Авіаційне паливо-гас має здатність фільтруватися через глину в чотири рази швидше води; тому водостійкий шар глини його не утримує. Цим пояснюється проникнення гасу в підземні водоносні горизонти і спливання його на поверхні джерельних вод, озер, у криницях на території населених пунктів. Така проблема існує сьогодні в м. Мукачеві (Закарпатської обл.), Василькові (Київської обл.), Стрию (Львівської обл.) та інших містах, межуючих із військовими аеродромами та підприємствами.

Забруднення водоносних горизонтів може бути викликане також незатампонованими артезіанськими свердловинами. Так на сьогодні в ЗС

України 976 артезіанських свердловин виведено з експлуатації і залишаються незатампонованими, тобто служать джерелами забруднення підземних вод.

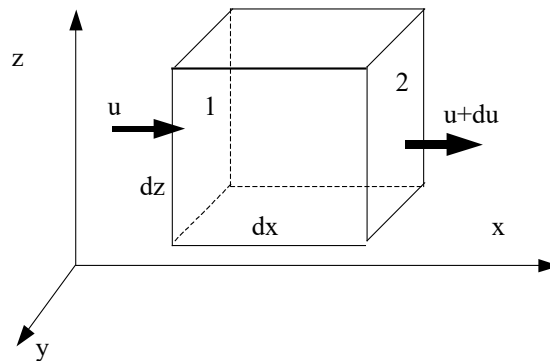
Досить часто проходить перекачка пального із резервуарів по пошкоджених трубопроводах, прокладених під землею, що також є причиною забруднення підземних вод.

## **Розділ 2**

### **Моделювання забруднення ґрунтових вод**

Розглянемо виведення рівняння масопереносу домішки у підземному потоці. Це рівняння будемо використовувати при моделюванні забруднення

підземних вод у випадку аварійного розливу на залізничному транспорті. Нехай пористий простір повністю заповнений водою. Виділимо у фільтраційному потоці контрольний об'єм у вигляді паралелепіпеда із сторонами  $dx dy dz$  (рис. 2.1).



**Рисунок 2. 1.** Контрольний об'єм для виведення рівняння перенесення домішки.

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

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

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

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

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

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

Вважатимемо, що перенесення домішки через грані контрольного об'єму здійснюється також за рахунок дисперсії. Тоді, через грань 1 за час  $dt$  буде перенесена маса домішки

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

а крізь грань 2

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

де  $D_x$  – коефіцієнт дисперсії.

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

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

При виведенні даного виразу були відкинуті доданки другого порядку трохи. Аналогічно, зміна кількості домішки в контрольному об'ємі за рахунок процесів конвекції і дисперсії у напрямі осей  $oy$  і  $oz$  складе

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial v\varphi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \right) dx dy dz dt, \\ & \left( \frac{\partial w\varphi}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \right) dx dy dz dt, \end{aligned}$$

де  $v, w$  – компоненти вектора швидкості фільтрації у напрямі осей  $oy$  і  $oz$ .

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

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

де  $n$  – активна пористість.



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

$$\frac{\partial n\varphi}{\partial t} + \frac{\partial u\varphi}{\partial x} + \frac{\partial v\varphi}{\partial y} + \frac{\partial w\varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right). \quad (1.1)$$

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

У рівнянні (3.1) для повнішого опису процесу руху домішки розрізняють коефіцієнти дисперсії по різних напрямках. Проте при практичному його використанні значна трудність полягає у визначенні залежностей  $D = f(x, y, z)$ . Експериментальне визначення параметра дисперсії в натурних умовах вимагає великих тимчасових і матеріальних витрат. Слід зазначити, що коефіцієнти дисперсії визначаються шляхом застосування аналітичного вирішення рівняння масопереносу при обробці даних фізичного експерименту, що проводиться з метою визначення поля концентрації забруднювача.

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

Для опису процесу необоротної сорбції використовується залежність вигляду

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

де  $N$  – кількість речовини, поглиненої твердою фазою, в одиниці виділеного об'єму  $[\text{кг}/\text{м}^3]$ ;

$\sigma$  – константа швидкості сорбції  $[1/\text{с}]$ ;

$\varphi$  – концентрація речовини в рідкому середовищі  $[\text{кг}/\text{м}^3]$ .

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

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

де  $\varphi$  – середня концентрація домішки в рідкій фазі;

$\varphi_p$  – концентрація рівноваги.

Точність прогнозів залежить від точності завдання параметрів моделі.

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

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

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

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

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

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

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

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

де  $Q_i(t)$  – інтенсивність точкового викиду

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

$\delta(x-x_i), \delta(y-y_i), \delta(z-z_i)$ , – позначення дельта-функція Дірака[11].

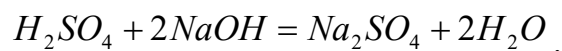
При вирішенні багатьох прикладних завдань має сенс використовувати двовимірну планову модель перенесення домішки у фільтраційному потоці [4,14].

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

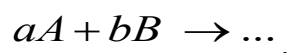
де  $\bar{Q}_i(t)$  – усереднена по глибині потоку інтенсивність точкового викиду.

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

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



Схематично реакцію взаємодії можна записати так :



Рівняння кінетики показує співвідношення: яка кількість (маса) нейтралізатора необхідна для нейтралізації конкретної кількості (маса) забруднювача. Це співвідношення використовується в чисельній моделі при розрахунку зміни кількості нейтралізатора і забруднювача в кожному контрольному об'ємі при їх хімічній взаємодії.

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

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

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

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

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

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

$M_b$  – молярна маса нейтралізатора;

a, b – стехіометричні коефіцієнти в рівнянні реакції.

В результаті хімічної взаємодії відбувається зменшення концентрації забруднювача і нейтралізатора в кожному контрольному об'ємі і розрахунок повторюється наново. При вирішенні завдань вважалося, що час реакції достатній швидко, тобто компоненти реагують миттєво. Якщо для реакції необхідне інше співвідношення реагуючих речовин, чим визначено стехіометричним співвідношенням, то при практичному застосуванні пакету програм, достатньо тільки задати необхідне співвідношення

### Розділ 3

#### Побудова розрахункових залежностей

Тривимірне рівняння масопереносу за наявності джерел викиду інтенсивністю  $qi$  має вигляд

$$n \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \frac{\partial w \varphi}{\partial z} + \sigma \varphi = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \sum_{i=1}^N q_i(t) \delta(r - r_i(t)), \quad (3.1)$$

де  $r_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ .

Запишемо поперемінно-трикутний алгоритм розщеплювання для чисельної інтеграції рівняння [13]. Невідоме значення  $\varphi$  визначатимемо в центрах різницевих осередків, а компоненти вектора швидкості  $u, v, w$  - на гранях осередків. Розщепнемо рівняння на тимчасовому проміжку  $tn < t < tn+1$  на послідовність рівнянь простішого вигляду. Запишемо розщеплювання початкового завдання в диференціальній формі [13]

$$\begin{aligned} n \frac{\partial \varphi^1}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^+ \varphi^1) + \frac{1}{4} \sigma \varphi^1 &= \frac{1}{4} \operatorname{div}(D_1 \cdot \nabla \varphi^1); \\ n \frac{\partial \varphi^2}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^- \varphi^2) + \frac{1}{4} \sigma \varphi^2 &= \frac{1}{4} \operatorname{div}(D_2 \cdot \nabla \varphi^2); \\ n \frac{\partial \varphi^3}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^- \varphi^3) + \frac{1}{4} \sigma \varphi^3 &= \frac{1}{4} \operatorname{div}(D_2 \cdot \nabla \varphi^3); \\ n \frac{\partial \varphi^4}{\partial t} + \frac{1}{2} \operatorname{div}(\vec{V}^+ \varphi^4) + \frac{1}{4} \sigma \varphi^4 &= \frac{1}{4} \operatorname{div}(D_1 \cdot \nabla \varphi^4). \end{aligned} \quad (3.2)$$

Початкова умова для кожного рівняння розщеплювання записується так:

$$\varphi \Big|_{t=t^n}^1 = \varphi(x, y, z, t^n), \quad \varphi \Big|_{t=t^n}^k = \varphi \Big|_{t=t^{n+1}}^{k-1}; \quad \varphi(x, y, z, t^{n+1}) = \varphi \Big|_{t=t^{n+1}}^5. \quad (3.3)$$

У даній системі рівнянь використані позначення

$$\begin{aligned} \vec{V}^\pm &= \|u^\pm, v^\pm, w^\pm\|, \quad u^\pm = \frac{u \pm |u|}{2}; \quad v^\pm = \frac{v \pm |v|}{2}; \quad w^\pm = \frac{w \pm |w|}{2}; \\ \tilde{D}_{1x} &= \frac{D}{1 + \frac{u^+ \Delta x}{D}}; \quad \tilde{D}_{1y} = \frac{D}{1 + \frac{v^+ \Delta y}{D}}; \quad \tilde{D}_{1z} = \frac{D}{1 + \frac{w^+ \Delta z}{D}}; \\ \tilde{D}_{2x} &= \frac{D}{1 - \frac{u^- \Delta x}{D}}; \quad \tilde{D}_{2y} = \frac{D}{1 - \frac{v^- \Delta y}{D}}; \quad \tilde{D}_{2z} = \frac{D}{1 - \frac{w^- \Delta z}{D}}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

П'яте рівняння враховує зміна величини  $\phi$  в просторі через дію джерел викиду. Для рівняння джерела забруднення п'ятий крок розщеплювання для системи має вигляд

$$n \frac{\partial \phi}{\partial t} = \sum_{i=1}^N q_i(t) \delta(r - r_i).$$

Запишемо різницевий аналог [13]:

- перший крок розщеплювання:

$$\begin{aligned} n \frac{\phi_{i,j,k}^{n+1} - \phi_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ + L_y^+ + L_z^+) \left( \phi_{i,j,k}^{n+1} \xi + \phi_{i,j,k}^n (1 - \xi) \right) + \frac{\sigma}{4} \phi_{i,j,k}^{n+1/2} = \\ = \frac{1}{4} \left[ (M_{xx}^+ + M_{yy}^+ + M_{zz}^+) \phi_{i,j,k}^{n+1} + (M_{xx}^- + M_{yy}^- + M_{zz}^-) \phi_{i,j,k}^n \right], \end{aligned} \quad (3.5)$$

де  $0 \leq \xi \leq 1$  - параметр;  $\phi_{i,j,k}^{n+1/2} = \frac{\phi_{i,j,k}^{n+1} + \phi_{i,j,k}^n}{2}$ ;

- другий крок розщеплювання:

$$\begin{aligned} n \frac{\phi_{i,j,k}^{n+1} - \phi_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- + L_y^- + L_z^-) \left( \phi_{i,j,k}^{n+1} \xi + \phi_{i,j,k}^n (1 - \xi) \right) + \frac{\sigma}{4} \phi_{i,j,k}^{n+1/2} = \\ = \frac{1}{4} \left[ (M_{xx}^- + M_{yy}^- + M_{zz}^-) \phi_{i,j,k}^{n+1} + (M_{xx}^+ + M_{yy}^+ + M_{zz}^+) \phi_{i,j,k}^n \right] \end{aligned} \quad (3.6)$$

- третій крок розщеплювання – використовується різницеве рівняння 3.6);
- четвертий крок розщеплювання – застосовується різницеве рівняння (3.5);
- п'ятий крок розщеплювання:

$$n \frac{\partial \phi}{\partial t} = \sum_{i=1}^N q_i(t) \delta(r - r_i(t)). \quad (3.7)$$

У дискретному вигляді дельта-функція Дираку “усереднюється” за об'ємом різницевого осередку із збереженням сумарної кількості забруднення, що викидається .

Функції  $q_i$ , рівні нулю скрізь, окрім осередків, де розташовано  $l$ -й джерело забруднення. У останніх осередках ці функції рівні одиниці. У системі різницевих рівнянь використані наступні позначення різницевих операторів:

$$L_x^+ \varphi_{i,j,k} = \frac{u_{i+1,j,k}^+ \varphi_{i,j,k} - u_{i,j,k}^+ \varphi_{i-1,j,k}}{\Delta x};$$

$$L_x^- \varphi_{i,j,k} = \frac{u_{i+1,j,k}^- \varphi_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}^- \varphi_{i,j,k}}{\Delta x};$$

$$L_y^+ \varphi_{i,j,k} = \frac{v_{i,j+1,k}^+ \varphi_{i,j,k} - v_{i,j,k}^+ \varphi_{i,j-1,k}}{\Delta y};$$

$$L_y^- \varphi_{i,j,k} = \frac{v_{i,j+1,k}^- \varphi_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}^- \varphi_{i,j,k}}{\Delta y};$$

$$M_{xx}^+ = \tilde{D}_{xl} \frac{-\varphi_{ij} - \varphi_{i-1,j}}{\Delta x^2}; \quad M_{xx}^- = \tilde{D}_{xp} \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}}{\Delta x^2};$$

$$\tilde{D}_{xl} = \frac{2D_{ijk}D_{i-1,jk}}{D_{ijk} + D_{i-1,jk}} \quad \text{и т.д.}$$

На кожному кроці розщеплювання шукана величина концентрації визначається по явній формулі рахунку, що біжить [3].

Ця модель використовувалась в роботі для моделювання процесу забруднення підземних вод при аварійному розливу кислоти на станції.

## Розділ 4 Експериментальне дослідження

Експериментальне дослідження проводилось на обладнанні кафедри гіdraulики та водопостачання університету.

На першому етапі досліджень був проведений фізичний експеримент по дослідженню поширення в ґрунті кислоти HCL (5% розчин) при розливі на поверхню ґрунта. Моделювався сценарій сходу потягу з реек та аварійного

розливу небезпечного вантажу. На рис.4.1 показано перший етап підготовки лабораторного обладнання до експерименту. Експеримент проводився в лабораторії фільтрації кафедри гідравліки та водопостачання університету ДНУЗТ.

Метою експерименту було визначення швидкості розповсюдження зони забруднення. Фізичне моделювання проводилось в фільтраційному лотку. Грунт – пісок. Кислота надходила на пісок зверху.





#### Рисунок 4.1. Підготовка обладнання до експерименту (лабораторія фільтрації)

При проведенні експерименту проводилась відеозйомка фільтрації кислоти у ґрунті.

Нижче на рисунку показана зона забруднення ґрунту.



Рисунок 4.2– Зона забруднення ґрунту  $t=21$ с

На основі обробки даних експерименту було визначено, що швидкість поширення фронту забруднення дорівнює 5см/с. Ці дані були використовані на етапі, коли проводився обчислювальний експеримент по визначенню розмірів зони забруднення на станції Кільчень при аварійному розливу кислоти.

На другому етапі експериментальних досліджень був проведений фізичний експеримент в спеціальному фільтраційному каналі. Метою поставленого експерименту з'явилася демонстрація можливості застосування нагнітальних свердловин для подачі нейтралізатора в ґрунт.

Експеримент проводився на фільтраційному лотку в лабораторії кафедри гідравліки і водопостачання ДНУЗТ. Експериментальна установка є

лотком з скляними стінками, заповненим ґрунтом – грубозернистим піском з дрібним каменем (коефіцієнт фільтрації по воді  $K = 0,14$  см/с). Робота нагнітальної свердловини моделювалася подачею води в перфоровану металеву трубку діаметром 2 див. Нижній кінець трубки був закритий, а перфорація була трьома крізним отвором (діаметром 0,4 см), розташованих тільки в нижній частині металевої трубки (рис. 4.3). Таким чином подача води в ґрунт здійснювалася виключно через нижню частину трубки. Металева трубка через гнучкий шланг з'єднувалася з ємкістю, заповненою водою ( $V = 1$  л). Для контрастності у воду додається марганцевокислий калій.

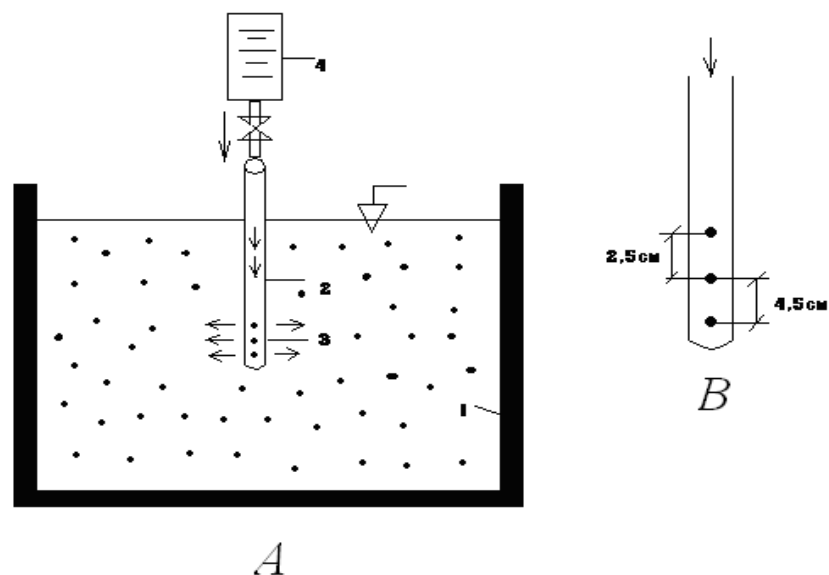


Рисунок 4. 3 – Схема експериментальної установки:

*A*- загальний вигляд; *B*- схема перфорованої трубки

*1* – ємність з ґрунтом (фільтраційний лоток);

*2* – перфорована трубка;

*3* – перфорація;

*4* – ємність з водою.

Перший знизу перфорований отвір знаходився на глибині 12см.

Експеримент проводився без підтримки постійного натиску в трубці, тобто забезпечувався разовий процес витікання води з живлячої ємкості.

Тим самим моделювався імпульсний режим роботи нагнітальної свердловини з натиском, що убиває по величині. Процес промочування ґрунту водою при роботі «свердловини» фіксувався за допомогою фотоапарата «CANON», що має таймер.

На рис. 4.4 – 4.5 представлені фотографії, що ілюструють динаміку процесу промочування ґрунту при роботі нагнітальної «свердловини». Виразно видно, що зона промочування, що формується, є геометричною фігурою, спочатку витягнутою, а потім близьку до круга. Деяка «деформація» контура цієї фігури обумовлена різним ступенем ущільнення ґрунту. Очевидна швидка швидкість промочування. Процес промочування закінчився через 25 с, при цьому верхня межа фронту промочування знаходилася на глибині  $h=2$  см від поверхні ґрунту. Таким чином, при вибраному режимі подачі води не відбувся вихід фронту промочування (тобто «нейтралізатора») на поверхню землі.



Рисунок 4.5 – Зона промочування ґрунту при роботі нагнітальної свердловини,  $t=3$  с



Рисунок 4.6 – Зона промочування ґрунту при роботі нагнітальної свердловини,  $t=7$  с



Рисунок 4.7 – Зона промочування ґрунту при роботі нагнітальної свердловини,  $t=12$  с

На подальших малюнках представлені результати експерименту щодо моделювання подачі 10% розчину  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

на ґрунт, куди заздалегідь був поданий 10% розчин  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Спочатку на ґрунт була подана кислота, яка, профільтрувавшись створила область забруднення. Потім через свердловину (металева перфорована труба), розташовану в центрі зони розливу почав подаватися нейтралізатор. Збоку від зони розливу розташовувалися дві перфоровані ємкості, які виконували роль колекторів, що забезпечують прийом рідини з ґрунту при роботі свердловини. На фотографіях показані зони, де виділявся з ґрунту газ, що утворюється в результаті реакції. На малюнку зображений лівий колектор. Виразно видно, що в ній зібралася рідина, що поступила і ґрунту при проведенні процесу нейтралізації.

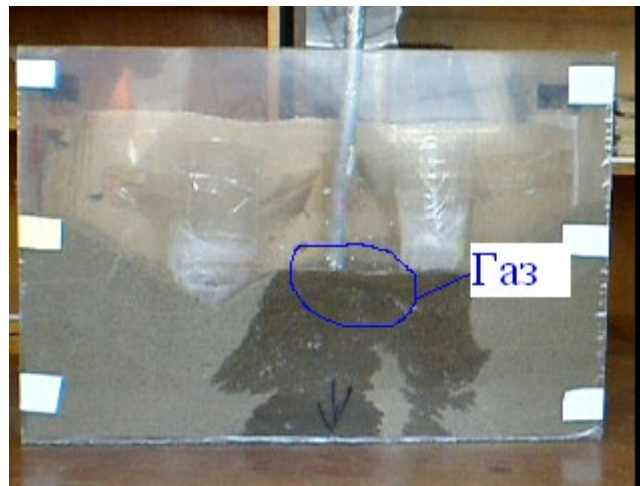


Рисунок 4.8 – Подача нейтралізатора в ґрунт через свердловину,  $t=5$  с

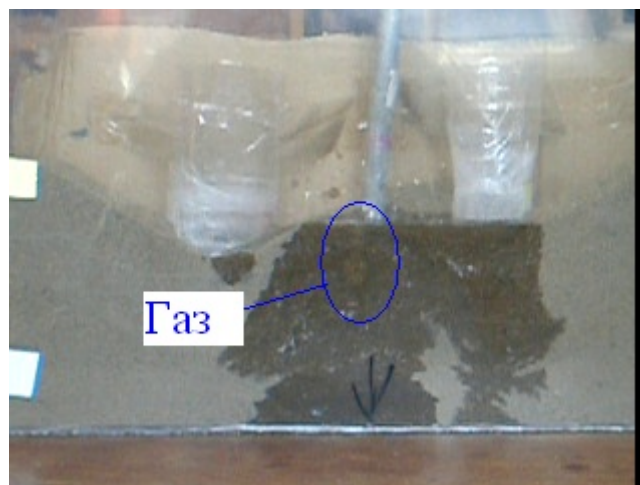


Рисунок 4.9 – Подача нейтралізатора в ґрунт через свердловину,  $t=10\text{с}$



Рисунок 4.10. - Рідина, зібрана в колекторі, після початку нейтралізації,  $t=120\text{с}$

Результати даного експерименту дозволяють рекомендувати застосування нагнітальних свердловин для ліквідації областей забруднення в зоні аерації. Необхідний час роботи свердловини (або групи свердловин) при заданих параметрах – концентрації нейтралізатора, розмірах ліквідовуваної зони забруднення, коефіцієнті фільтрації і так далі можна визначити шляхом застосування розглянутих нижче математичних моделей.

## Розділ 5

### Обчислювальний експеримент

Далі, при виконанні дипломної роботи був проведений обчислювальний експеримент. Розглядався аварійний розлив кислоти HCL біля станції Кільчень (рис.5.1)

На першому етапі моделювалася фільтраційний потік кислоти в ґрунт до підземних вод після аварії на станції. Процесс движения кислоти моделюється уравнением фильтрации и уравнением массопереноса :

$$\mu \frac{dz}{dt} = k \frac{H(t) + z}{z},$$
$$n \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial z} + \sigma \varphi = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right),$$

где  $\mu$  – недостаток насыщения;  $z$  – глубина смачивания ґрунта;  $k$  – коэффициент фильтрации;  $H$  – уровень кислоты на поверхности земли;  $n$  – активная пористость;  $\varphi$  - концентрация кислоты;  $\sigma$  – константа скорости сорбции;  $u$  – скорость фильтрации;  $D$  - коэффициент дисперсии.

Моделювання проводилось при таких параметрах:  $\varphi_0=100$  одиниць. Гидрогеологические параметры:  $n=0,26$ ;  $\sigma=0$ ;  $K=0,057$  м/с ,  $D=0,0032 \cdot u$ . Зона аерації 4.7м. Результати розрахунку концентрації кислоти в зоні аерації наведені в табл. 5.1.

Таблица 5.1 Концентрація кислоти в зоні аерації

Год	Глибина 0.7м	Глибина 1.5м	Глибина 2.7м
2.3	32 г/л	0	0
7.4	67 г/л	43 г/л	9 г/л
9.5	100 г/л	100 г/л	87 г/л



Як ми бачимо з таблиці, приблизно за 9годин кислота потрапляє скрізь зону аерації в підземні води

На наступному етапі моделювалось поширення кислоти в підземних водах, після проходження зони аерації. Розглядається розлив 180т сірчаної кислоти. Тут використовувався багатофакторна модель поширення домишки у підземних вода, що була розглянута раніше.

Динамика формування зони забруднення в підземних водах біля станції Кільчень показана на рисунках.

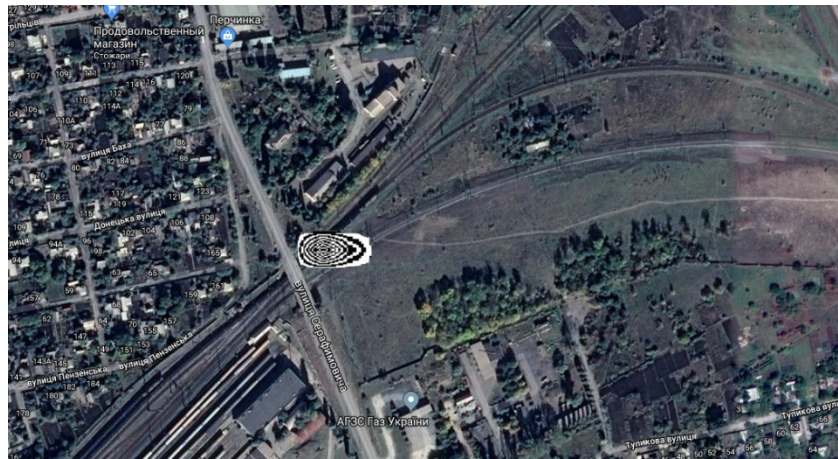


Рисунок 5.1. Зона забруднення підземних вод  $t=15.1$ год



Рисунок 5.2. Зона забруднення підземних вод  $t=21.2$ год





Рисунок 5.3. Зона забруднення підземних вод  $t=33.1$  год

Як ми бачимо з рисунків у випадку аварійного розливу кислоти формується значна за розмірами зона забруднення підземних вод. Ми бачимо, що зона поширюється в напрямку руху ґрунтового потоку.

За 33 годин після аварії довжина зони забруднення буде 402м. Ширина зони забруднення біля 32м. Тобто, необхідно швидко організувати захисні заходи з метою захисту водного середовища від забруднення.

Приклад практичного застосування моделі ілюструється нижчим. Розглядається процес ліквідації розливу біля ст. Кільчень. Обчислювальний експеримент проводився при таких параметрах: розміри розрахункової області  $44\text{м} \times 45\text{м} \times 49\text{м}$ ; концентрація кислоти  $\text{HCL}$  в ґрунті зони аерації –  $17 \text{ кг/м}^3$ ; використовується нейтралізатор –  $\text{NaOH}$  – 10% розчин; подача  $Q = 0,93 \text{ л/с}$ ;  $D_x = D_y = D_z = 0,01 V_{x,y,z} V$  – швидкість течії; активна пористість 0,41.

Коефіцієнт фільтрації прийнятий рівному тому значенню, яке було отримано в результаті проведеного (на кафедрі гідравлики та водопостачання) експерименту по методу Нестерова Н.С.(подача луґу в зону аерації після подачі кислоти),  $k=0,05\text{см/хв.}$ ,  $n=0,3$ . В процесі проведення обчислювального експерименту варіювалося положення нагнітальної свердловини. У першому варіанті нагнітання нейтралізатора відбувається в зони забруднення (координати свердловини:  $x=11 \text{ м}$ ;  $y=12\text{м}$ ;  $z=15 \text{ м}$ ), а в другову варіанті – подача нейтралізатора в точці

$x=19$ . м;  $y=12$ м;  $z=15$  м).

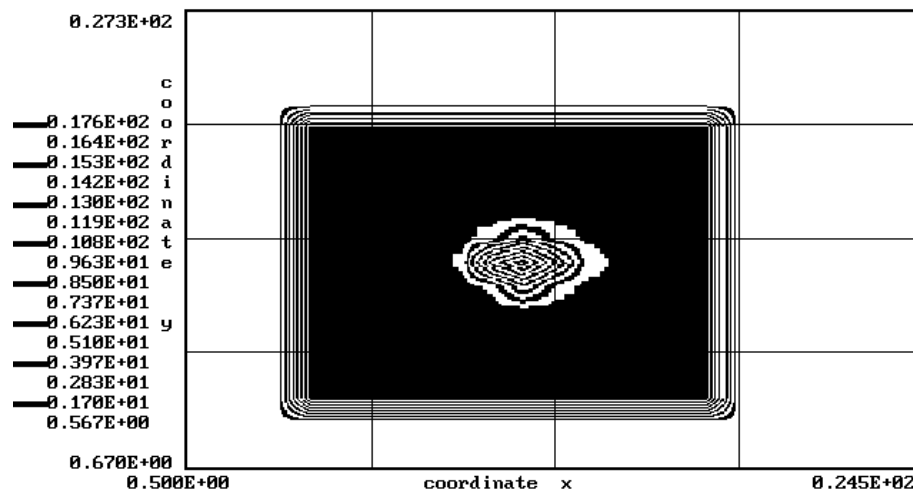


Рисунок 5.4 – Розподіл нейтралізатора в зоні аерації,  $t=4011$  с.

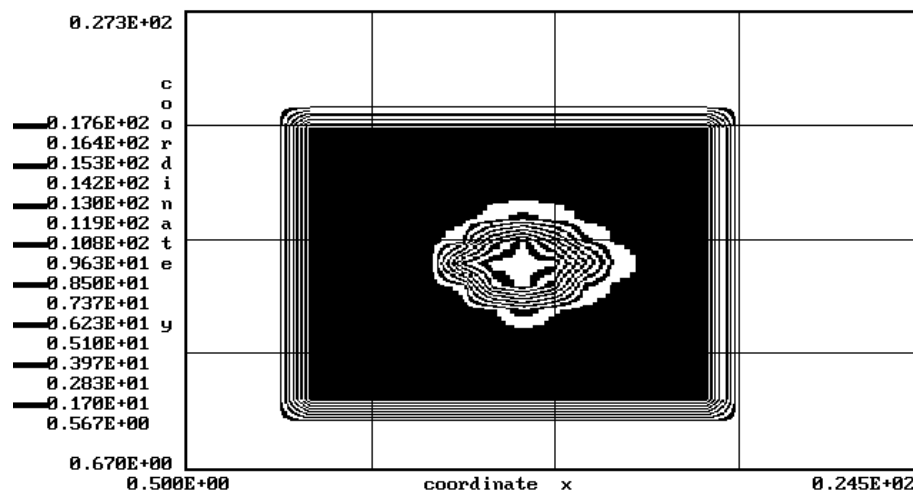


Рисунок 5.5 – Розподіл нейтралізатора в зоні аерації,  $t=9126$  с.

На рис. 5.6 – 5.8 зображена динаміка зміни розмірів і інтенсивності області забруднення при роботі нагнітальної свердловини з урахуванням хімічної взаємодії між забруднювачем і нейтралізатором.

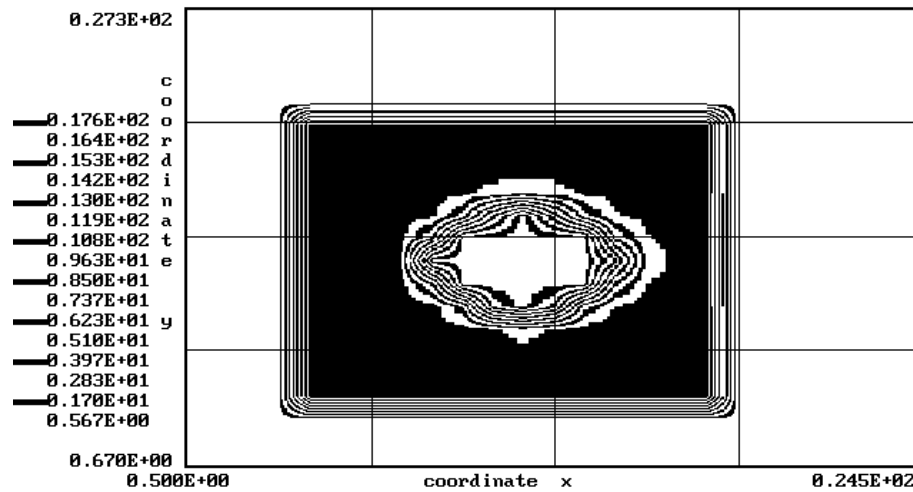


Рисунок 5.6 – Розподіл забруднювача в зоні аерації,  $t=4018$  с.

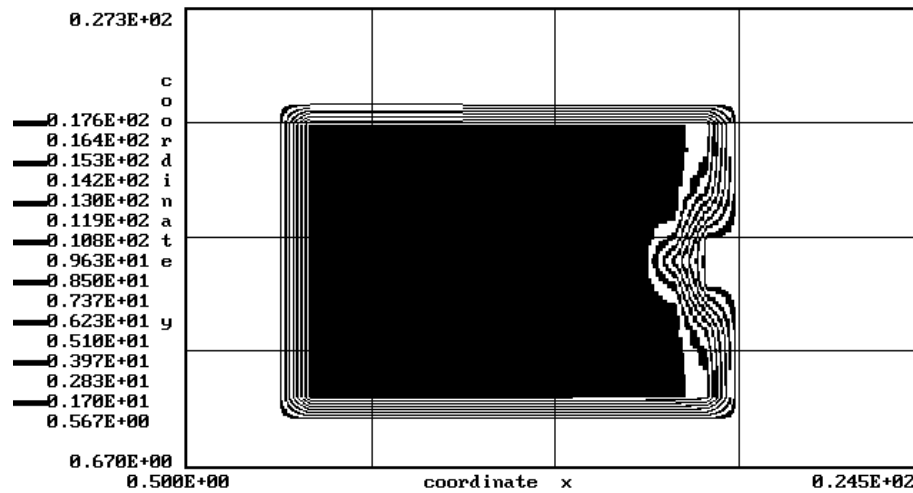


Рисунок 5.7 – Розподіл забруднювача в зоні аерації,  $t=9004$  с.

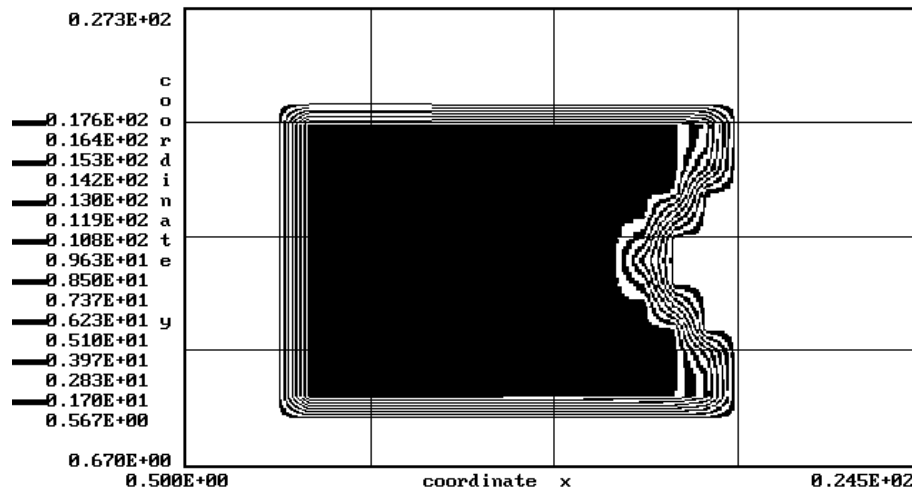


Рисунок 5.8 – Розподіл забруднювача в зоні аерації,  $t=22156$  с.

З приведених малюнків виразно видно, як відбувається помітне зменшення області забруднення при подачі нейтралізатора.

На рис. 5.8 представлена область забруднення зони аерації при другому варіанті розміщення нагнітальної свердловини – на межі зони забруднення. Добре видно, що в цьому випадку, нейтралізатор як би «вгризається» в область, зайняту забруднювачем, поступово рухаючись до центру області забруднення. Проте ефективність процесу нейтралізації для розглянутого варіанту – знижується. Це добре видно з табл. 5.2, де представлена інформація про кількість нейтралізованого забруднювача в ґрунті, для двох варіантів розташування свердловини.

Таблиця 5.2 – Кількість нейтралізованого забруднювача в ґрунті при роботі нагнітальної свердловини

$t, \text{с}$	Маса нейтралізованого забруднювача, кг	
	Перший варіант	Другий варіант
9011	9341	6281
12987	11736	91067
24555	23879	2043
27234	27567	23865

Слід зазначити, що початкова маса забруднювача в ґрунті (для моменту часу  $t=0$ ) складає близько 70 т.

Зниження ефективності нейтралізації можна пояснити тим, що при другому варіанті розміщення нагнітальної свердловини частина нейтралізатора не потрапляє в область забруднення, а йде в ту частину зони аерації, яка не піддавалася забрудненню в результаті аварійного розливу.

Таким чином, за допомогою розробленої чисельної моделі є можливість проаналізувати і оцінити ефективність нейтралізації забруднювача в зоні аерації для конкретних параметрів ґрунту і параметрів, що характеризують роботу нагнітальної свердловини, що подає нейтралізатор (розміщення свердловини в області забруднення, її дебіт, режим роботи). Відзначимо, що в розробленій чисельній моделі є можливість задавати різну кількість нагнітальних свердловин і їх різне розміщення в зоні аерації. Це дає можливість дослідникові методом обчислювального експерименту здійснити розрахунок серії варіантів організації подачі нейтралізатора в область забруднення і вибрати оптимальний.

## Розділ 6

### Економічні розрахунки.

Слід зазначити, що аварійні розливи на залізничному транспорті приводять до значного економічного збитку. Наприклад, розглянемо розрахунок величини збитку при розливі на поверхню ґрунту 30 т сірчаної кислоти.

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

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

$$V_n = F \times m \times na \quad (6.1)$$

де  $F$  – площа забруднення, кв. м;

$$F = 120875;$$

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

$$m = 10;$$

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

$$na = 0,05.$$

Визначаємо цю величину згідно даній формулі:

$$V_n = 120875 \times 10 \times 0,05;$$

$$V_n = 60437.$$

Розмір збитку розраховується по формулі:

$$Z_{nv} = V_n \times n \times V_z \times \alpha, \quad (6.2)$$

де  $n$  - розмір неоподаткованого мінімуму доходів;

$$n = 17;$$

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

$$V_z = 0,0051;$$

$\alpha$  – коефіцієнт, який враховує природну захищеність підземних вод і ґрунтів;

$$\alpha = 1,3;$$

$$Z_{пв} = 60437 \cdot 17 \cdot 0,0051 \cdot 1,3;$$

$$Z_{пв} = 6812 \text{ грн.}$$

Таким чином розмір збитку унаслідок розливу на поверхню ґрунту даного забруднювача складає 6812 грн.

## **ВИСНОВКИ**

1. Розглянути чинники забруднення підземних вод.
2. Побудована математична модель забруднення підземних вод при аварійних розливах на залізниці.
3. Проведен фізичний експеримент по визначенню швидкості руху в ґрунті потоку сірчаної кислоти.
4. Проведений обчислювальний експеримент по визначенню розмірів зони забруднення при аварійному розливі кислоти на станції Кривий Ріг.



### Список використаних джерел

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: учебное пособие; под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – М.: Издательство АСВ, 2001. - (в 5 кн.)
2. Алексеев В. С. Проектное обоснование восстановления водоносных горизонтов, загрязненных нефтепродуктами / Алексеев В. С., Куранов Н. П., Куранов П. Н. / Водоснабжение и санитарная техника. – 1999.– с. 42 – 43.; №4.
3. Вопросы автоматизированного решения задач фильтрации на ЭВМ / Ляшко И. И., Сергиенко И. В., Мистецкий Г. Е., Скопецкий В. В.– К.: Наукова думка, 1977.–288 с.
4. Беляев Н. Н. Применение поглощающих скважин для подавления развития зоны загрязнения подземного потока / Беляев Н. Н., Долина Л. Ф., Калашников И. В. – Д.: 2004. — с. 181 – 186. (Екологія і природокористування. Ін. проблем природокористування та екології НАН України, вип. 7).
5. Беляев Н. Н. Ликвидация последствий аварий с жидкими опасными грузами / Беляев Н. Н. Калашников И. В. Матеріали другої міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів» - Д.: Україна, 01–03 жовтня 2003 р. – Д.: 2003.– с. 47–48.
6. Беляев Н. Н. Аварии при перевозке жидких опасных грузов: прогноз последствий, защита водной среды / Беляев Н. Н., Калашников И. В., Жовтонога Н. Н. Зб. матеріалів 6–го Міжнар. Симп. «Екологічні проблеми Чорного моря», 11–12 листопада, 2004 р. Одеськ. Центр наук.-техніч. та економіч. інформації. – О.: ОУНТЕПІ, 2004 р. – с. 40-44.
7. Беляев Н. Н. Метод расчета процесса промывки грунта нейтрализующим раствором / Беляев Н. Н., Калашников И. В., Оноприенко Д. М.: Вісн. Дніпрпетр. держ. аграрного ун., №1, 2005. — с. 24–27.
8. Беляев Н. Н. Гидродинамический метод защиты подземных вод от

загрязнения / Беляев Н. Н., Калашников И. В. Материалы 7-й науч.-практ. конф. «Вода: проблемы и решения» - Д.: Гамалія, 2004. – с. 46.

9. Беляев Н. Н. Исследование загрязнения подземных вод от накопителей жидких отходов. / Беляев Н. Н., Калашников И. В. Материалы 8-й Научно-практической конференции «Вода: проблемы и решения», 10 декабря 2007 г. - Д.: Видавничо-творчий центр «Гамалія» – с.172.

10. Беляев Н. Н. Ликвидация зон загрязнения подземных потоков после аварии с жидкими грузами / Беляев Н. Н., Калашников И. В. Тези доп. наук.-практ. конф «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління». К.: 2003. –Техніка, технологія, ч. 1. – с.47.

11. Беляев Н. Н. Моделирование загрязнения подземных потоков после аварии / Беляев Н. Н., Калашников И. В., Оноприенко Д. М. 4-й Междунар. симп. «Безопасность жизнедеятельности в XXI веке», январь 2004 г. – Д.: 2004 – с. 82.

12. Беляев Н. Н. Исследование эффективности гидродинамического метода защиты от загрязнения подземных вод методом математического моделирования / Беляев Н. Н., Калашников И. В. VII «Наука і освіта» - 2004, 10–25 лютого 2004 р. - с. 8.

13. Беляев Н. Н. Компьютерное моделирование динамики движения и загрязнения подземных вод / Беляев Н. Н., Коренюк Е. Д., Хрущ В. К. – Д.: Наука и образование, 2001. – 156 с.

14. Беляев Н. Н. Ликвидация зон загрязнения в грунтовых водах нейтрализующими растворами / Беляев Н. Н., Оноприенко Д. М., Калашников И. В. Вісн. Дніпропетр. держ. агр. ун.–2006. — с. 41-43, №2.

15. Беляев Н. Н. Физическое и математическое моделирование процессов защиты зоны аэрации от загрязнения / Беляев Н. Н., Калашников И. В. Вісн. Дніпропетр. нац. ун. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Д., 2008. –Вип. 23, С. 128-132

16. Бе́ляев Н. Н. Математическое моделирование процесса промывки зоны аэрации / Бе́ляев Н. Н., Калашников И. В. Вісн. Дніпрпетр. нац. ун. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Д., 2008. –Вип. 24, С. 100-102
17. Бе́ляев Н. Н. Моделирование эффективности защиты подземной стены / Бе́ляев Н. Н., Калашников И. В., Моисеенко К. Я. Строительство, материаловедение, машиностроение. Сборник научных трудов. Вып. 40. Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепропетровск, 2007, С. 40-45
18. Бе́ляев Н. Н. Численное моделирование процесса нейтрализации кислоты в зоне аэрации / Бе́ляев Н. Н., Калашников И. В., Машихина П. Б. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Збірник наук. Праць. Дніпропетровський національний університет. Вип. 9, 2005. С.11 – 17
19. Бе́ляев Н. Н. Применение откачивающих скважин для защиты подземного потока от загрязнения / Бе́ляев Н. Н., Калашников И. В. Вісн. Дніпрпетр. нац. ун. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Д., 2006. –Вип. 12, С. 21 – 24
20. Бе́ляев Н. Н. Применение математического и физического экспериментов при исследовании процессов защиты подземных вод / Бе́ляев Н. Н., Калашников И. В., Щербак Г. А. Матеріали 3-ої Міжнародної молодіжної наукової конференції «Довкілля – XXI», Т. 4, 5 – 6 жовтня, 2006, Дніпропетровськ, Інститут проблем природокористування та екології НАН України, С.8
21. Бертокс П. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений / Бертокс П. Радд Д. М.: Мир, 1980.- 606 С.
22. Бомба А. Я. Математичне моделювання процесів масопереносу з урахуванням малих деформацій середовища Актуальні проблеми водного господарства / Бомба А. Я., Хлапук М. Н., Сидорчук Б. П.– Рівне: Вид-во УДАВГ, 1997. – т.1. – с.11–15.

23. Бочеввер Ф. М. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений / Бочеввер Ф. М., Орадовская А. Е.—М.: Недра, 1972.—129 с.
24. Бочеввер Ф. М. Защита подземных вод от загрязнения / Бочеввер Ф. М., Лапшин Н. Н., Орадовская А. Е. — М.: Недра, 1979. — 256 с.
25. Брюцкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. — 443 с.
26. Вахрамеев И. И. Теоретические основы тампонажа горных пород. — М.: Недра, 1968 — 293 с.
27. Владимиров А. М. Охрана окружающей среды / Владимиров А. М. Ляхин Ю. И., Матвеев Л. Т., Орлов В. Г. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 423 с.
28. Власюк А. П. Фільтраційна консолідація глинистих ґрунтів при наявності масопереносу солей / Власюк А. П., Жеребят'єв О. В. Вісн. Укр. держ. акад. водного господарства, вип. 27. — 1998. — с.40-43.
29. Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ / Под ред. Р.С. Штенгелова — М.: Изд-во МГУ, 1994. — 335 с.
30. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород / Н.Н. Веригин, С. В. Васильев, В. С. Саркисян, Б. С. Шержуков — М.: Недра, 1997. — 271 с.
31. Глущенко А. А. Деякі неізотермічні задачі теорії масопереносу в ґрунтових водах / Глущенко А. А., Гординська Т. Л. Вісн. Укр. держ. акад. водного господарства.— 1998. Вип. 27. — с.48–51.
32. Голубев В. С. Гетерогенные процессы геохимической миграции / Голубев В. С., Гарибянц А. А. — М.: Недра, 1968. — 190 с.
33. Гольдберг В. М. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / Гольдберг В. М., Газда С. — М.: Недра, 1984,—262 с.
34. Гольдберг В. М. Методические рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод. — М.: ВСЕГИНГЕО, 1980.— 68 с.

35. Гольдберг В. М. Проницаемость и фильтрация в глинах / Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. – М.: Недра 1986.–172с.
36. Громадка Т. Комплексный метод граничных элементов / Громадка Т., Лей Ч. – М.: Мир, 1990.–304 с.
37. Евграшкина Г. П. Закономірності зміни гідрогеологічних умов у гірничо-видобувних регіонах (на прикладі Західного Донбасу) – Автореф. дис. д-ра геологічних наук. – К., 2006. – 38 с.
38. Евграшкина Г.П. Влияние горнодобывающей промышленности на гидрогеологические и почвенно-мелиоративные условия территорий. – Днепропетровск, «Монолит», 2003. – 200 с.
39. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. – К: Наукова думка.–1997.–368 с.
40. Зеленько Ю. В. Кинетика миграции дизельного топлива через грунты во время технологических проливов и транспортных аварий / Зеленько Ю. В., Плахотник В. И. Вісн. Дніпропетр. нац. ун. Д., 2004. Вип. 3, с. 30–33
41. Калашников И. В. Защита зоны аэрации и подземных вод при аварийных разливах на железнодорожном транспорте. Тезисы 68 Международной научной-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта», 22-23 трав. 2008 р., Дніпропетровськ, с.29-30.
42. Калашников И. В. Исследование процессов загрязнения подземных вод после аварийных разливов на базе дискретных моделей. Матеріали 3-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Динаміка наукових досліджень – 2004». 21–30 червня 2004 р. – Д.: Т. 33 Екологія, Наука і освіта, 2004– с. 33–34.
43. Калашников И. В. Ликвидация зоны загрязнения в подземном потоке с помощью системы скважин The Sixth Intern. Scientific Forum AIMS for Future of engineering science, March 23–30, 2005, Hong Kong. – P. 275 – 277.
44. Калашников И. В. Применение нейтрализующих растворов для ликвидации области загрязнения в зоне аэрации и в подземном водоносном

горизонте Вісн. Дніпропетр. нац. ун. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Д., 2006. – Вип. 11, С. 19-23

45. Калашников И. В. Защита подземных вод от загрязнения с помощью подземных стен «Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту» Тези 66-ї Міжнар. наук.-практ. конф: Д., 11–12 травня 2006 р., Д., 2006. – с. 241-242.

46. Калашников И. В. Защита зоны аэрации и подземных вод при аварийных разливах на железнодорожном транспорте / Пробл. та перспективи розвитку залізничного трансп.: Тези 68-ї міжнар. наук.-практ. конф., Дніпропетровськ, 22-23 травня 2008 року, С. 29 – 30.

47. Калашников И. В. Численное моделирование нестационарных процессов загрязнения подземных вод Вісн. Дніпропетр. нац. ун. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Д., 2007. – Вип. 19, С. 42 – 46

48. Константинов Ю. Н. Гидравлика. К.: Вища школа, 1981. –360 с.

49. Коптилая О. В. Расчет убытков, которые наносят окружающей среде аварийные разливы аммиака / Коптилая О. В. Калашников И. В., Беляев Н. Н. 36. наук. пр. Дніпропетр. держ. техн. ун. заліз. трансп., Д., 2002. – Вип. 12.

50. Крайнов С. Р. Геохимические модели прогноза формирования качества подземных вод (обзор возможностей и ограничений). Водные ресурсы. – 1999, Т.26, №3. – с.322–334.

51. Купаев В. И. Методы локализации очага аварий и ликвидации ее последствий на химически опасных объектах железнодорожного транспорта / Купаев В. И., Рассказов С. В. Транспорт. Наука, техника, управление, 2003. – №4– с. 28-34.

52. Лаврик В. И. Асимптотичне розв'язання двомірних задач масопереносу при фільтрації підземних вод в неоднородно-анізотропних середовищах. Лаврик В. И., Власюк А. П. Вісн. Укр. держ. акад. водного господарства. Рівне, 1998. – Вип. 27.– с.102-108.