

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВЛАСОВ ВЛАДИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 004.9:622.1:504.1

ДИСЕРТАЦІЯ

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ
ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ГІДРОЕКОБЕЗПЕКОЮ ПРИ
СИНХРОНІЗАЦІЇ ВУГЛЕВИДОБУТКУ ТА ЗГОРТАННЯ ГІРНИЧИХ
РОБІТ У ЗАХІДНОМУ ДОНБАСІ**

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

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.С. Власов

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник – Алексєєв Михайло Олександрович, д.т.н., професор

Дніпро – 2023

АНОТАЦІЯ

Власов В.С. Математичні моделі для автоматизації процесу керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт у Західному Донбасі. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня (доктора філософії) за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2023.

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, що полягає в обґрунтуванні гідрогеомеханічних параметрів, які обумовлюють фізичне формування гідроризиків при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт на основі створення послідовності чисельних математичних моделей як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою в умовах шахт Західного Донбасу. Завдання вирішено шляхом створення і впровадження методики використання послідовності фізичних та математичних моделей, зокрема розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє автоматизувати прогнозування гідроекологічних ризиків на площах, де формуються мульди осідання денної поверхні в прибережних зонах річок для прийняття управлінських рішень під час закриття шахт.

Мета роботи полягає в створенні та впровадженні послідовності чисельних математичних моделей і програмного забезпечення як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою шахтних полів у Західному Донбасі для обґрунтування гідрогеомеханічних параметрів, що обумовлюють фізичне формування гідроризиків при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт.

Об'єкт дослідження – процеси формування гідроризиків та система керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку і згортання гірничих робіт у Західному Донбасі.

Предмет дослідження – параметрична структура фізичних та математичних комп'ютерних моделей геофільтрації на шахтних полях Західного

Донбасу і аналітичне обґрунтування програмного забезпечення тривимірного відображення динаміки гірського масиву, земної поверхні та рівневої поверхні підземних вод.

У першому розділі виконано аналіз основних чинників, які найбільш суттєво впливають на формування факторів гідроекобезпеки при веденні та згортанні гірничих робіт і можливу синхронізацію цих процесів. Визначено основні чинники для врахування певної послідовності створення логічно обумовленого модельного ряду відображення факторів гідробезпеки. Виконано аналіз інформаційних систем та програмного забезпечення, призначених для вирішення завдань керування гідродинамічними та геомеханічними процесами при веденні та згортанні гірничих робіт.

Другий розділ дисертації присвячений обґрунтуванню методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля для автоматизації процесів керування синхронізацією гірничих робіт та їх згортанням із мінімізацією негативних гідродинамічних явищ, а саме: проведено емпірично-аналітичне дослідження параметрів водопроникного розрідження гірських порід під час розробки вугільних пластів та здійснено аналітичний вибір методу оцінки параметрів керування геофільтрацією в порушеному гірничими роботами масиві шахтного поля. Ідентифіковано модельні рішення і реальні геофільтраційні об'єкти методом електрогідродинамічних аналогій за даними натурних вимірювань і моделювання на еквівалентних матеріалах. Наведено математичну основу математичного моделювання процесу фільтрації підземних вод під час експлуатації та затоплення шахт.

У розділі 3 виконано обґрунтування гідробезпеки підробки регіонального водоносного горизонту в Західному Донбасі. Для цього проведено оцінку проникаючої здатності бучацьких пісків, досліджено механізм формування прориву водопіщаної суміші в гірничі виробки та обґрунтовано механізм формування аномальних водоприпливів.

У розділі 4 надано аналітичне обґрунтування і реалізація програмного забезпечення побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля,

а саме: обґрунтовано методику прогнозування зрушень гірського масиву та земної поверхні у Західному Донбасі з використанням комп'ютерного моделювання; розроблено тривимірну модель підробленої земної поверхні; програмне забезпечення для відображення наслідків вуглевидобутку і закриття шахт Західного Донбасу, що формують гідроризики на шахтному полі; архітектуру бази даних для програмного забезпечення. Наведено реалізацію розробленої програми як дослідницької апробації.

П'ятий розділ присвячений реалізації використання послідовності обґрунтованих моделей як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою вуглевидобутку та згортання гірничих робіт, а саме: наведено геофільтраційну комп'ютерну модель Західного Донбасу, яка складає загальну основу локалізації та фрагментації будь-якої іншої модельної ділянки (наприклад, окремого шахтного поля або блока, виїмкової ділянки, технологічного елемента міграції шахтних вод, водозабору питної та технічної води, площі підтоплення та ін.); наведено фільтраційну комп'ютерну модель шахтних полів і модель суміжних шахт, що готуються до закриття в режимі синхронізації гірничих робіт та їх згортання з виконанням їх ідентифікації. Наведено результати комп'ютерного моделювання для різних варіантів синхронізації гірничих робіт і закриття суміжних шахт та надано рекомендації щодо мінімізації гідроекологічних наслідків для них. Виконано оцінку економічної ефективності впровадження рішень щодо прогнозування наслідків підтоплення площі гірничого відводу шахти. Запропоновано три варіанти розвитку подій відносно ділянок земель, які знаходяться в зоні ризику.

Основні наукові і практичні результати роботи:

1. Визначено основні чинники для врахування певної послідовності створення логічно обумовленого модельного ряду, на основі аналізу геомеханічних та гідродинамічних чинників, які найбільш суттєво впливають на формування факторів гідроекобезпеки при веденні і згортанні гірничих робіт та можливу синхронізацію цих процесів:

– з аналітичного співставлення існуючих інформаційних систем та програмних продуктів для вирішення завдань керування гідрогеодинамічними процесами при веденні й згортанні гірничих робіт, а також дослідження гідроекологічних ризиків підтвердили необхідність суттєвого вдосконалення методики моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами за допомогою оновленого програмного забезпечення.

2. Виходячи з попереднього висновку щодо складання методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля з автоматизацією процесу керування гідроекобезпекою було конкретизовано фізичний стан об'єкта досліджень шляхом натурних і лабораторних експериментів, фізичного моделювання та емпіріоаналітичних обґрунтувань і математичного опису елементів побудови послідовності комп'ютерних моделей:

– за геофізичними вимірами деформації надвугільної товщі у свердловинах над рухомим очисним вибоєм отримано графіки параметрів деформування гірських порід у часі, які інтерпретовані за класичним рівнянням з ядром Абеля з новим фізичним змістом, як параметри пружно-реологічної піддатливості масиву, що необхідно для тлумачення нелінійності фільтраційних геомеханічних змін у моделях;

– надано пояснення і доказ гідростатичного розподілу напружень у подошві бучацького водоносного горизонту, де при моделюванні фільтраційні збурення спричиняють практично рівномірне переміщення центральних і периферійних точок з об'ємом мульди зсуву, рівним об'єму водовмісного піщаного матеріалу;

– показано, що суміщення чисельних алгоритмів комп'ютерного моделювання методами скінченних різниць і методом скінченних елементів відповідає загальному принципу керованості технічних систем, як і системи «водоносні породи – гірничі виробки»;

– імітаційний пошук параметрів проникності зони підробки очисним вибоєм здійснено аналоговим моделюванням на резисторній електрогідродинамічній моделі та співставленням результатів з параметрами розтікання

води в лаві, що дозволяє дійти висновку про паралельне застосування горизонтальних і зсувних деформацій при інтегруванні чисельних моделей;

– показано, що математичною основою комп'ютерного моделювання процесу геофільтрації при експлуатації та затопленні шахт є чисельне розв'язання рівняння несталої планової фільтрації за явно-неявною схемою, коли є дотримання потокового балансу по всій області моделі.

3. При обґрунтуванні гідробезпеки регіонального водоносного горизонту в Західному Донбасі досягнуто таких результатів:

– показано, що навколо розкритої тріщини у гірській породі утворюється захисна зона «зворотний фільтр», з якої вимиваються дрібні фракції піску, а крупні утворюють захисну зону за співвідношенням $d_{50} / d_{10} > 2$, де d_{50} та d_{10} є діаметрами фракцій з відповідним вмістом у водоносному горизонті 50 % і 10 %;

– за умов, коли доступ до вимірів розкриття тріщин відсутній, знайдено емпіріоаналітичне тлумачення логарифмічної лінеаризації залежності між проникністю підробленої товщі порід і кратністю підробки, що з урахуванням отриманих ймовірнісних показників зернового складу бучацького піску дозволило гарантовано виявити існуючий резерв захисних властивостей аргілітів та алевролітів у Західному Донбасі, який дорівнює 3,0;

– проведено геомеханічне моделювання водозахисних функцій горизонтально розшарованих порід за рахунок процесу зрушення над рухомим очисним вибоєм (або їх штучного утворення гідророзчленуванням через спеціальні свердловини), що в сукупності з результатами оригінального натурального вимірювання поглинання води через шар бучацького піску над очисним вибоєм, а також аналітичного рішення і розрахунку динаміки проникнення бучацького піску через тріщину в свердловині підтверджує висновки попереднього пункту;

– вищенаведені результати з дослідження водозахисних властивостей розшарованої товщі аргілітів та алевролітів дозволили поширити їх тлумачення і встановити механізм прориву водопіщаної суміші через покрівлю

магістрального штреку, де формується міжшарова лінза накопичення води з її подальшим проривом у штрек та одночасним гальмуванням руху піску у воронці впливу з бучацького горизонту та конусі припливу до штреку.

4. Аналітичні, експериментальні та фізико-математичні обґрунтування складають уявлення і підходи для використання існуючих програмних продуктів з чисельного моделювання геофільтрації у порушеному гірничими роботами масиві шахтного поля, а також визначили підстави для вдосконалення методики моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами за допомогою розробки оновленого програмного забезпечення з відображенням динаміки змін тривимірної комп'ютерної моделі сукупності шахтопластів. Найбільш показові результати цього етапу дисертаційної роботи є такі:

- обґрунтовано й апробовано методику моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами в умовах шахти «Тернівська», при цьому запропоновано математична модель побудови поверхонь з регулярною мережею – інтерполяційна і поліноміальна, які дозволяють отримати адекватне уявлення про поверхні, а також є базисом для підрахунку об'ємів, наведених у вигляді суми елементарних призм по кожному вузлу мережі;

- просторова інтерполяція точкових даних ґрунтується на виборі аналітичної моделі поверхні, а у зв'язку з неможливістю опису усієї поверхні однією функцією для просторової інтерполяції поверхонь з регулярним розміщенням опорних точок використано методи локальної інтерполяції, при цьому для визначення значення показника у вузлу використовується не вся сукупність наявних даних, а тільки виміри, що знаходяться навколо цієї точки;

- розроблене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати прогнозування гідроекологічних ризиків на площах, де формуються мульди осідання денної поверхні в прибережних зонах річок (Програмне забезпечення моделювання поверхонь виконано на мові Visual C++ під операційну систему Windows з використанням інструментальних засобів відкритої графічної бібліотеки OpenGL);

– розроблений графічний інтерфейс враховує аналіз поведінки цільового користувача й останні тенденції в сфері User Experience;

– програмне забезпечення вирішує завдання оптимізації та спрощення збору, зберігання й обробки даних за допомогою розробленої бази параметрів свердловин, а також дозволяє розрахувати площу поверхні й об'єм масиву між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають в різні періоди, за допомогою модуля «Калькулятор осідань», причому різниця значень показників осідань поверхні складає не більше 6 % у порівнянні з результатами маркшейдерських вимірів і розрахунків при послідовному вийманні вугільних пластів, що є параметричним регулятором планування програм гірничих робіт з мінімізацією ризиків гідроекобезпеки разом з використанням аналітичної залежності за поліномом третього ступеня між зміною об'ємів затоплення поверхні за послідовного виймання чотирьох пластів.

5. Визначена у дисертаційній роботі мета щодо створення послідовності фізичних і комп'ютерних моделей, як науково-практичного інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою вуглевидобутку і згортання гірничих робіт, звичайно потребувала надання результатів впровадження. За цих умов надано, з відповідними обґрунтуваннями у підрозділах розділу 5, такі результати:

– створена комп'ютерна геофільтраційна модель Західного Донбасу, яка складає загальну основу локалізації та фрагментації будь-якої іншої модельної ділянки (наприклад, окремого шахтного поля або блока, виїмкової ділянки, технологічного елемента міграції шахтних вод, водозабору питної та технічної води, площі підтоплення і та ін.), завжди входить до складу обґрунтувань з прийняття інженерних рішень гідроекобезпеки з урахуванням критеріїв порушень водообміну, спрогнозованих моделюванням;

– створена фільтраційна комп'ютерна модель шахтних полів і модель суміжних шахт, що готуються до закриття в режимі синхронізації гірничих робіт та їх згортання з виконанням їх ідентифікації;

– надано результати комп'ютерного моделювання для різних варіантів синхронізації гірничих робіт і закриття суміжних шахт з рекомендаціями щодо мінімізації гідроекологічних наслідків для них;

– виконано оцінку економічної ефективності використання оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Параметрична логістика автоматизації процесу керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт і їх згортання складається з послідовності геофізичних вимірів деформацій у покрівлі рухомого очисного вибою, які відображають пружно-реологічну динаміку зрушень масиву до поверхні карбону з ядром повзучості Абеля та подальшим сполученням цього результату з геометричними розмірами зони фільтрації у вибої за вимірами на електрогідродинамічній моделі, що дозволяє аналітично узагальнити рівняння керуваності технічних систем у вигляді синтезу чисельних моделей геофільтрації і геомеханіки на основі комп'ютерних програм.

2. Математичне моделювання динаміки опускання поверхні шахтного поля в Західному Донбасі реалізується побудовою поверхонь з регулярною інтерполяційною і поліноміальною мережами, причому просторова інтерполяція ґрунтується на аналітичному виборі моделі поверхні і подальшою її деталізацією локальною інтерполяцією за вимірами навколо кожної точки, а порівняння суми елементарних призм по кожному вузлу мережі з поверхнею ґрунтових вод і водоймищ дозволяє знайти контури площ підтоплення і затоплення у прибережних зонах з описом динаміки їхньої зміни у просторі і часі на скінченно-різницевих багат шарових моделях геофільтрації з відображенням нестационарного гідродинамічного балансу, показники якого є модельними параметрами гідроекопорушень масиву і його стабілізації за варіантним рядом керуючих інженерних рішень.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше доведено, що складання методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля з автоматизацією процесу керування гідро-екобезпекою конкретизується фізичним моделюванням та емпіріоаналітичними обґрунтуваннями і математичним описом елементів побудови послідовності комп'ютерних моделей.

2. Вперше за геофізичними вимірами деформації надвугільної товщі у свердловинах над рухомим очисним вибоєм отримано графіки параметрів деформування гірських порід у часі, які інтерпретовані за класичним рівнянням з ядром Абеля з новим фізичним змістом, як параметри пружно-реологічної піддатливості масиву, що необхідно для тлумачення нелінійності фільтраційних геомеханічних змін у моделях та разом з доказом гідростатичного розподілу напружень у підшві бучацького водоносного горизонту. Це дозволяє використати комп'ютерно-інтегровані технології для моделювання фільтраційних збурень, які спричиняють практично рівномірне переміщення центральних і периферійних точок з об'ємом мульди зсуву, рівним об'єму водовмісного піщаного матеріалу, та сформулюють нове фізичне уявлення водо-захисних функцій масиву.

3. Вперше імітаційний пошук параметрів проникності зони підробки очисним вибоєм здійснено аналоговим моделюванням на резисторній електро-гідродинамічній моделі та співставленням результатів з параметрами розтікання води в лаві, що дозволяє дійти висновку про паралельне застосування горизонтальних і зсувних деформацій при інтегруванні чисельних моделей, а математичною основою комп'ютерного моделювання процесу геофільтрації при експлуатації та затопленні шахт є чисельне розв'язання рівняння несталої планової фільтрації за явно-неявною схемою, коли є дотримання потокового балансу по всій області моделі.

4. Удосконалено обґрунтування гідробезпеки регіонального водоносного горизонту в Західному Донбасі і показано, що навколо розкритої тріщини у гірській породі утворюється захисна зона «зворотний фільтр», з якої вими-

ваються дрібні фракції піску, а крупні утворюють захисну зону за співвідношенням $d_{50}/d_{10} > 2$, де d_{50} та d_{10} є діаметрами фракцій з відповідним вмістом у водоносному горизонті 50 % і 10 %, що дозволяє підвищити якість геофільтраційної моделі при використанні комп'ютерно-інтегрованих технологій.

5. Розширено уявлення про фізичні параметри підробки водонасичених пісків, коли доступ до вимірів розкриття тріщин відсутній, знайдено емпіріо-аналітичне тлумачення логарифмічної лінеаризації залежності між проникністю підробленої товщі порід і кратністю підробки, що з урахуванням отриманих ймовірнісних показників зернового складу бучацького піску дозволило гарантовано виявити існуючий резерв захисних властивостей аргілітів та алевролітів у Західному Донбасі, який дорівнює 3,0.

6. Удосконалено обґрунтування й апробовано методику моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами в умовах шахт Західного Донбасу, при цьому запропоновано оптимальні моделі побудови поверхонь з регулярною мережею – інтерполяційна і поліноміальна, які дозволяють отримати адекватне уявлення про поверхні, а також вони є базисом для підрахунку об'ємів, наведених у вигляді суми елементарних призм по кожному вузлу мережі, що дозволяє приймати управлінські рішення щодо зменшення фінансового навантаження на вугледобувне підприємство під час його закриття.

Практичне значення роботи:

1. Створено та впроваджено послідовність чисельних комп'ютерних моделей і програмного забезпечення як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою шахтних полів у Західному Донбасі.

2. Розроблено математичний і алгоритмічний апарат, який дозволив створити ефективні моделі земної поверхні і водоносного горизонту, а також визначити об'єм між початковою земною поверхнею, що осіла, а також між водоносним горизонтом і поверхнею, для визначення ділянок затоплення.

3. Розроблене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати прогнозування гідроекологічних ризиків на площах, де формуються мульди осідання денної поверхні в прибережних зонах річок (Програмне забезпечення моделювання поверхонь виконано на мові Visual C++ під операційну систему Windows з використанням інструментальних засобів відкритої графічної бібліотеки OpenGL).

4. Розроблений графічний інтерфейс враховує аналіз поведінки цільового користувача й останні тенденції в сфері User Experience.

5. Розроблено постійнодіючу геофільтраційну комп'ютерну модель шахтних полів Західного Донбасу, яка відображає динаміку балансу підземних та поверхневих вод і є базовою для вирішення завдань керування гідроекобезпекою окремих шахт.

6. Виконано оцінку економічної ефективності використання оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля.

Реалізація результатів роботи

Результати досліджень використано при виконанні науково-дослідної роботи 040844-21 «Гідрогелогічний прогноз наслідків ліквідації шахт «Ювілейна» та «Степова» ВСП «ШУ Першотравенське» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» та у навчальному процесі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» при підготовці аспірантів спеціальності 184 «Гірництво» з дисципліни «Тенденції розвитку комп'ютерних методів оптимізації технологічних процесів у гірництві».

Ключові слова: автоматизація процесу керування, бази даних, водопрплив, гідроекобезпека, закриття і затоплення шахт, Західний Донбас, комп'ютерно-інтегровані технології, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів, осадові породи, тріщинуватість, параметри проникності та ємності, програмне забезпечення, фільтрація, чисельне моделювання, фізичні та математичні моделі.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні наукові результати дисертації опубліковані в наступних працях:

Фахові видання:

Монографії:

1. Власов В.С. Фізичні і комп'ютерні моделі у системі керування гідроекобезпекою шахтних полів: монографія / І.О. Садовенко, М.О. Алексеєв, В.С. Власов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: ПП «Ліра ЛТД», 2023. 192 с. ISBN 978-966-981-786-0.

Статті у періодичних фахових виданнях України:

2. Власов В.С. Обґрунтування параметрів об'ємного моделювання масиву гірських порід навколо очисних і підготовчих виробок / С.Ф. Власов, В.С. Власов // Науково-технічний збірник «Розробка родовищ 2015» Д.: НГУ – Літограф, 2015. С. 367 – 375. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/104658>.

3. Vlasov V.S. Modeling of the earth's surface subsidence during its undermining by stopping in coal mines / A.S. Zelensky, V.S. Lysenko, M.A. Alekseyev, V.S. Vlasov // Naukovyi Visnyk NGU, 2020. (6). С. 121 – 127. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/121>. (Наукометрична база **Scopus**).

4. Власов В.С. Автоматизація геолого-маркшейдерського забезпечення для прогнозування гідроекологічних ризиків, які виникають при закритті вугільних шахт / М.О. Алексеєв, О.С. Кучин, В.С. Власов // Гірничі електро-механіка та автоматика. НТУ «ДП», 2020. С. 44 – 51. ISSN 0201-7814.

Статті та тези доповідей:

5. Vlasov V. Simulation of Rock Convergence in a Longwall / A.A. Sidelnikov, V.S. Vlasov, V.E. Valyushko // The 6th International forum for students and young researches «Widening our horizon» Volume 2.D. (Dnepropetrovsk, April 14 –15); National Mining University, 2011. P. 53-54.

6. Власов В.С. Моделювання опускання земної поверхні при закритті вугільних шахт. / М.О. Алексеєв, В.С. Власов // XIII Міжнародна конференція «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та

промисловості». Збірник наукових праць № 3 (Дніпро, 23 – 24 листопада 2017); НТУ «Дніпровська політехніка», 2017. С. 116 – 117. ISBN 978-966-350-692-0.

7. Vlasov V. Models and information systems of ecological and economical risks with decision making on the closure of coal mines / M. Aleksieiev, V. Vlasov // Фізико-хімічні геотехнології – 2018: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 10 – 11 жовтня 2018); НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. С. 68. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/153333>.

8. Власов В.С. Система підтримки прийняття рішень для мінімізації гідроеколого-економічних ризиків при підробці поверхні гірничими виробками / М.О. Алексеєв, В.С. Власов // Матеріали наук.-тех. конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 22 – 24 травня 2019); ДВНЗ Криворізький національний університет, 2019. С. 126. <https://shorturl.at/gpsx0>.

9. Власов В.С. Обґрунтування методики тривимірного моделювання деформації земної поверхні при виїмці вугільних пластів на шахтах Західного Донбасу / М.О. Алексеєв, В.С. Власов // Modern Movement of Science: abstracts of the 10th International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, 2-3 april, 2020), 2020. P. 27 – 30. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2020/04/P-1>.

10. Власов В.С. Автоматизація процесу керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку і згортання гірничих робіт шахтних полів / В.С. Власов // Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення», (Тернопіль, Україна – Перевоськ, Польща), 6 – 7 липня 2023), 2023. С. 10 – 11. <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1240/>.

11. Власов В.С. Комп'ютерне моделювання у системі керування гідроекобезпекою шахтних полів / В.С. Власов // The 5th international scientific and practical internet conference «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates»: Ukraine, Dnipro, august 3 – 4, 2023. P. 137 – 138. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/08/>.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві: [1] – аналіз інформаційних систем та програмних продуктів, призначених для вирішення завдань керування гідрогеодинамічними процесами при веденні гірничих робіт. Аналітичне обґрунтування і реалізація програмного забезпечення побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля; [2] – обґрунтовано параметри тривимірного моделювання масиву гірських порід для умов шахт Західного Донбасу; [3] – побудова геомеханічної комп'ютерної моделі та моделювання процесів осідання земної поверхні, що дозволяє визначити площі й об'єми затопленої поверхні; [4] – розробка методики підготовки даних для автоматизації геолого-маркшейдерського забезпечення прогнозування гідроекологічних ризиків, які виникають при закритті вугільних шахт та їх моделювання за допомогою програми «САМАРА»; [5] – визначення величини конвергенції у лаві залежно від положення лінії очисного вибою; [6] – постановка завдання та визначення алгоритму мінімізації гідроекологічних ризиків за допомогою моделювання опускання земної поверхні при закритті вугільних шахт; [7] – розроблено базу даних тривимірних координат відпрацювання вугільних пластів для конкретних гірничо-геологічних умов шахти «Тернівська» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля»; [8] – розробка методики прийняття рішень для мінімізації гідроеколого-економічних ризиків при ліквідації вугільних шахт. Аналіз ГІС систем (GRASS, gvGIS, QGis, ArcGis і САМАРА), що дозволяють будувати моделі досліджуваного об'єкта; [9] – обґрунтування методики тривимірного моделювання деформації земної поверхні при вийманні вугільних пластів на шахтах Західного Донбасу; [10] – обґрунтування гідрогеомеханічних параметрів, що обумовлюють фізичне формування гідроризиків при синхронізації вуглевидобутку і згорання гірничих робіт на основі створення послідовності фізичних і математичних комп'ютерних моделей як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою вуглевидобутку у Західному Донбасі; [11] – розробка оновленого програмного забезпечення з відображенням динаміки змін тривимірної комп'ютерної моделі сукупності шахтопластів, що виймаються довгими стовпами, для створення автоматизованої системи прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті шахт Західного Донбасу.

ABSTRACT

Vlasov, V.S. Mathematical models to automate a process controlling hydroecosafety while synchronizing coal mining operations and shutting them down in the context of the Western Donbas. Qualification research work presented as manuscript.

Paper for a PhD degree in the field of ‘Automation and computer integrated technologies’ (specialty 151). Dnipro University of Technology of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro 2023.

The thesis has solved the topical research problem being substantiation of hydromechanical parameters which stipulate physical formation of hydrorisks while synchronizing coal mining operations and shutting them down on the basis of the development of numerical mathematical models as a tool to automate processes controlling hydroecosafety in the context of the Western Donbas mines. The problem has been solved through the development and implementation of methods to apply a sequence of physical and mathematical models. Among other things, special software has been developed making it possible to automate forecasting of hydroecological risks within the areas where day surface subsidence troughs are shaped in coastal river zones. The software will help make managerial decisions while shutting down mines.

The research purpose is to develop and implement a sequence of physical and mathematical models as well as software as a tool automating processes to control hydroecosafety of mine fields in the Western Donbas required for substantiation of hydromechanical parameters stipulating physical formation of hydrorisks while synchronizing coal mining operations and shutting them down.

The research object is to analyze processes of hydrorisk formation and a system to control hydroecosafety while synchronizing mining operations in the Western Donbas and shutting them down.

The research subject is a parametrical structure of physical and mathematical geofiltration computer models within mine fields of the Western Donbas and

analytical substantiation of the software of 3D mapping dynamics of rock mass, the earth's surface, and surface level of underground water.

Chapter one is the analysis of the key factors influencing heavily the formation of hydroecosafety factors during mining operations and their shutting down as well as potential synchronization of the procedures. The basic factors have been identified for consideration of a certain sequence to develop logic-based model series mapping the hydroecosafety factors. Information systems and software, intended to solve the problems of control over hydrodynamic and geomechanical processes while coal mining operations and shutting them down have been analyzed.

Chapter two of the thesis concerns substantiation of the methods of model representation of the parameters of a mine field rock mass to automate processes controlling synchronization of mining operations and their shutting down with minimization of negative hydrodynamic phenomena. In particular, empirical and analytical study of permeable rock dilution parameters during coal formation mining has been performed, and analytical choice as for parameters to control geofiltration in the disturbed rock mass of a mine field has been made. Model solutions as well as real geofiltration objects have been identified through a method of electrohydrodynamic analogies based upon full-scale measurements and simulation using equivalent materials. Mathematical framework of the mathematical modelling of underwater filtration process during mine operation and shutting down has been given.

Chapter three substantiates hydrosafety of a regional aquifer undermining in the Western Donbas. For the purpose, penetrability of Buchach sand has been assessed; a formation mechanism of water-sand mixture inrush into mine workings has been analyzed; and a formation mechanism of abnormal water inflows has been substantiated.

Chapter four is the analytical substantiation and implementation of software to construct 3D model of the watered mine field. Methods, forecasting displacements of rock mass as well as the earth's surface in the Western Donbas, have been substantiated; 3D model of the undermined earth's surface has been constructed;

software to demonstrate after-effects of coal extraction and closure of the Western Donbas mines, forming hydro risks within a mine field, has been developed; and data bases for the software have been architected. Implementation of the developed program as a research-based approbation has been shown.

Chapter five concerns implementation of a series of the substantiated models as the tool to automate processes controlling hydroecosafety of coal mining operations as well as their shutting down. In particular, a geofiltration computer model of the Western Donbas has been demonstrated. The model is a common basis for localization and fragmentation of any other model site (for instance, separate mine field or block, working area; technological component of mine water migration, potable or service water withdrawal, water-logging zone etc.). A filtration computer model of mine fields as well as model of neighbouring mines being prepared for closure in a sync mode of mining operations and shutting them down inclusive of their identification has been demonstrated. Computer modelling results have been shown for different alternatives to synchronize mining operations in the neighbouring mines and their shutting down; recommendations have been given as for minimization of hydroecological after-effects for them. Economic efficiency has been assessed concerning implementation of the solutions towards forecast of consequences of mine allotment water-logging. Three development alternatives have been proposed as for land areas in the danger zone.

The main scientific and practical results of the research

1. The basic factors have been identified to take into consideration a certain sequence for the development of a logic-based model series relying upon the analysis of geomechanical and hydrodynamic indicators influencing heavily the formation of hydroecosafety factors during mining and shutting it down, and possible synchronization of the processes:

- analytical comparison of the available information systems and software to solve the problems to control hydrodynamic processes during mining as well as

shutting it down, and analysis of hydroecological risks has supported the idea to improve significantly simulation methods of the earth's surface subsidence while its undermining; the abovementioned can be done using the updated software.

2. Based upon the previous conclusion as for the development of methods for model representation of rock mass parameters of a mine field with automation of the process to control hydroecosafety, a physical state of the research object has been specified through the field and lab experiments, physical simulation, empiric and analytical substantiation, and mathematical description of the elements involved in the development of a series of computer models. The data have helped obtain the following:

- geophysical measurements of coal-overlying formation in wells above a movable stope have made it possible to get graphs of rock strain temporal parameters interpreted in terms of classical equation with Abel kernel inclusive of a new physical content being elastic and rheological parameters of rock formation deformability required to explain nonlinear nature of the filtration geomechanical changes in the models;

- stress distribution in a Buchach aquifer foot has been explained and proved since within the area filtration disturbances during the simulation initiate practically uniform displacement of both central and peripheral points where the volume of shear trough is equal to the volume of water-containing sand material;

- it has been demonstrated that combination of numerical computer modelling through the finite difference methods and finite element method corresponds to the general idea of a technical system controllability as well as to *aqueous rock-mine workings* system;

- search for permeability parameters of a zone, undermined by means of a stope, has been simulated through the analogue modelling. For the purpose, a resistor electrohydrodynamic model has been applied as well as comparison of the results with the parameters of water spreading over the longwall. The abovementioned helps draw a conclusion on the parallel use of horizontal and shear strains while integrating the numerical models; and

– it has been shown that the mathematical basis for the computer modelling of a geofiltration process during mine operating and flooding is numerical solving of the equation of unstable scheduled filtration in terms of explicit-implicit scheme when flow balance is followed throughout the model area.

3. Hydrosafety substantiation of a regional aquifer in the Western Donbas has helped achieve following results:

– it has been shown that around a fissure, open in rock, a protective *inverse filter* zone occurs from which fine sand fractions are washed out; in turn, large sand fractions generate a protective zone in terms of $d_{50} / d_{10} > 2$ ratio where d_{50} and d_{10} are diameters of fractions with 50 % and 10 % content in the aquifer, respectively;

– if access to the measure fissure opening is not available, empiric and analytical interpretation of logarithmic linearization has been found for the dependence between permeability of the undermined rock formation and the undermining frequency. Taking into consideration the obtained probability indices of Buchach sand grain composition, the abovementioned has helped identify reliably the available reserve of argillite and aleurite protective characteristics in the Western Donbas being 3.0;

– waterproof functions of horizontally stratified rocks have been simulated geomechanically at the expense of a displacement process taking place over a movable stope (or by means of their artificial formation using hydraulic partition through the specific wells). Combined with the results of the original field measurements of water penetration into a Buchach sand layer over a stope as well as analytical solution and calculation of dynamics the Buchach sand passes through a fissure in the well, it supports conclusions represented in the previous point; and

– the results of studies, concerning waterproof characteristics of the stratified argillite and aleurite formation, have helped propagate their interpretation and identify a mechanism of water-sand mixture inrush through the main drift roof where interlayer lens of water accumulation is shaped with its further inrush in the drift with simultaneous sand stopping-down in a cone outflow from Buchach level and a cone of inflow to the drift.

4. The analytical, experimental, and physico-mathematical substantiations are both ideas and approaches to apply the available software for numerical simulation of geofiltration within a mine field formation, disturbed by the extraction operations. Moreover, they have defined the fundamentals to improve modelling methods of the earth's surface subsidence in the period of its undermining through the development of the updated software representing dynamics of changes in 3D computer model of a system of seams in the mine. The most indicative findings of the thesis stage are as follows:

- a simulation methods of earth's surface subsidence during its undermining in *Ternivska* mine have been substantiated and tested. In this context, optimum models to construct surfaces with a regular network (i.e. interpolating and polynomial) have been proposed helping get an adequate idea of the surfaces. In addition, they are the basis to calculate the volumes shown in the form of the total of elementary prisms for each node of the network;

- spatial interpolation of the point data is based upon the selection of an analytical model of the surface. Since it is impossible to describe the whole surface through one function for spatial interpolation of surface with regular arrangement of anchor points, local interpolation methods have been applied. In this context, to determine an index value in the point only measurements around it are used rather than the whole totality of the available data;

- the developed software makes it possible to automate forecasting of hydroecological risks within the areas where day surface subsidence troughs are shaped in the coastal river zones (the software to simulate surfaces has been designed using Visual C++ language for Windows OS with the use of tools from the open graphics library OpenGL);

- the designed graphic interface involves analysis of the intended user behaviour as well as the latest tendencies in the field of User Experience; and

- the software solves problems to optimize and simplify information collection and the data storage and processing using the developed well parameter base; moreover, it helps calculate both surface area and rock mass amount between

the level surface of an aquifer and surfaces experiencing subsidence in different periods. For the purpose, *Subsidence calculator* module is available. Besides, a difference in the earth's surface subsidence values is not more than 6% to compare with the results of surveying measurements and calculations under systematic extraction of coal seams. Hence, it is a parametric regulator while mining scheduling with hydroecosafety risk minimization; it uses analytical dependence in terms of the third order polynomial between the changes in surface flooding objects under the systematic extraction of four seams.

5. It goes without saying that the purpose, defined by the thesis, concerning the development of sequence of physical and computer models as a scientific and practical tool for automation of processes to control hydroecosafety of coal mining and its shutting down, requires implementation results. Consequently, following results with relevant substantiations are listed in subsections of Chapter 5:

- a computer geofiltration model of the Western Donbas has been developed. The model is the general basis for localization and fragmentation of any other model site (for instance, separate mine field or block, mining area, technological element of mine water migration, potable or service water withdrawal, water-logging zone etc.) is always a component of substantiations while making engineering decisions on hydroecosafety taking into consideration the criteria of water exchange disturbances forecasted by the simulation;

- a filtration computer model of mine fields, and a model of neighbouring mines, being prepared for closure in a sync mode of mining and its shutting down, inclusive of their identification;

- computer modelling results for different alternatives of mining synchronization and closure of neighbouring mines have been presented with the recommendations for minimization of hydroecological after-effects; and

- economic efficiency has been assessed as for use of the updated software to construct a 3D model of the watered mine field.

Scientific positions to be presented during the defence

1. Parametric logic to automate a process of hydroecosafety control while coal mining and shutting it down is a sequence of geophysical measurements of strains within the roof of movable stope. They demonstrate elastic and rheological dynamics of rock formation displacements up to the Carboniferous surface with Abel creep kernel, and further combination of the result with geometry of a filtration zone in a mine working according to measurements by an electrohydrodynamic model. In general, it helps generalize analytically a controllability equation of technical systems in the form of synthesis of geofiltration and geomechanical numerical models based upon the computer programs.

2. Mathematical modelling of dynamics of the mine field surface subsidence in the Western Donbas is implemented through the construction of surfaces with regular interpolation and polynomial boundaries. In this vein, spatial interpolation is based on analytical selection of a surface model and its further detalization by means of local interpolation relying upon the measurements around each point. Comparison of the total of elementary prisms according to each network node with the surface of ground water and ponds helps define the areas of water-logging as well as flooding within the coastal zones inclusive of dynamics of their temporal and spatial changes using finite-difference multilayer geofiltration models with representation of non-stationary hydrodynamic balance which indicators are model parameters of rock mass hydroecodisturbances, and its stabilization according to alternative series of the controlling engineering solutions.

Originality of the findings

1. It has been proved for the first time that drawing up of the methods for model presentation of a mine field rock mass parameters with the automated hydroecosafety control is specified through physical simulation, empiric and

analytical substantiation, and mathematical description of the elements to develop a sequence of computer models.

2. For the first time ever, geophysical measurements of coal-overlying formation strain in wells above a movable stope have helped obtain graphs of temporal rock deformation parameters. They have been interpreted according to the classical equation with Abel kernel inclusive of such innovative content as parameters of elastic and rheological rock mass deformability required to explain nonlinear nature of the filtration geomechanical changes in the models together with a proof of hydrostatic stress distribution within a foot of Buchach aquifer. The abovementioned provides a means for computer integrated technology use to simulate filtration disturbances causing almost uniform transfer of both central and peripheral points with the shear trough volume being equal to water-bearing sand material; moreover, they will form a new physical idea of waterproof rock mass functions.

3. Firstly, search for permeability parameters of an undermined zone involved analogue simulation using an electrohydrodynamic model, and comparison of the results with the parameters of water spreading in a longwall. The above-stated helps conclude on the parallel use of horizontal and shear strains while integrating numerical models. In addition, mathematical basis for computer modelling of geofiltration process under operation of mines and their flooding is a numerical solving of unstable scheduled filtration equation with the use of an explicit-implicit scheme where the flow balance is followed across the whole model area.

4. Hydraulic safety of the regional Western Donbas aquifer has been improved. It has been shown that a protective zone (i.e. inverse filter) occurs around a fissure open in the rock. Fine sand fractions are washed out from it; in turn, large ones form a protective zone with $d_{50}/d_{10} > 2$ ratio where d_{50} and d_{10} are fraction diameters with 50% and 10% content in the aquifer, respectively. The data helps improve significantly the geofiltration model while using computer-integrated technology.

5. To extend the idea of physical parameters of water-saturated sand undermining, when there is no any access to fissure opening measurements, the empiric and analytical interpretation of logarithmic linear dependence between the undermined formation permeability and the undermining frequency has been found. Taking into consideration the obtained probability indicators of Buchach sand grain composition, the abovementioned has made it possible to identify reliably the available reserve of protective argillite and aleurite characteristics in the Western Donbas. The reserve is 3.0.

6. Substantiation and testing of the methods to model earth's surface subsidence during its undermining under the conditions of the Western Donbas mines have been improved. In this vein, a mathematical model to construct surfaces with regular network (i.e. interpolation and polynomial) has been proposed. They help obtain an adequate idea of the surfaces. Moreover, it is the basis to calculate the volumes, represented in the form of the total of elementary prisms for each point of the network. The above-stated helps make managerial decisions as for mitigation of financial burden on a coal-mining enterprise during its closure.

Practical implications of the research

1. A sequence of numerical computer models and software have been developed and implemented as the tool to automate the processes controlling hydroecosafety of mine fields in the Western Donbas.

2. A mathematical and algorithmic apparatus has been designed which helped construct efficient model of both earth's surface and aquifer as well as define the volume between the initial earth's surface and that one experienced its subsidence, and aquifer and surface to identify the flooding sites.

3. Software has been designed to automate forecasting of hydroecological risks within the areas where day surface subsidence troughs are shaped in coastal river zones. The software to simulate surfaces has been developed using Visual C++

language for Windows OS with the use of tools from the open graphics library OpenGL).

4. The developed graphic interface involves analysis of the intended user behaviour as well as the latest tendencies in the field of User Experience.

5. A permanent geofiltration computer model of mine fields in the Western Donbas has been constructed to display balance dynamics of the underground and ground water. The model is the basic one to solve problems of hydroecosafety control in certain mines.

6. Economic efficiency of the upgraded software to construct a 3D model of the watered mine field has been assessed.

Implementation of the findings

The findings have been applied to carry out a scientific research project 040844-21 «Hydrogeologic consequences of liquidation activities connected with *Yuvileina* and *Stepova* mines» (SSU «ShU *Pershotravenske*», DTEK *Pavlohradvuhillia*), and for academic activities at Dnipro University of Technology while training post-graduates *Development tendencies of computer methods to optimize mining technological processes* discipline (Specialism area 184 Mining).

Keywords: automation of a control process, databases, water inflow, hydroecosafety, shutting-down and flooding of mines, Western Donbas, computer-integrated technology, stress-strain state, finite element method, sedimentary rocks, fissuring, permeability and capacitance parameters, software, filtration, numerical simulation, physical and mathematical models.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT ON THE TOPIC OF THE THESIS

The key findings of the thesis have been published in following papers:

Professional editions:

Monographs:

1. Vlasov, V.S. Physical and computer models in the system controlling hydroecosafety of mine fields: monograph / I.A. Sadovenko, M.A. Alekseiiev, & V.S.Vlasov; Ministry of education and science of Ukraine, Dnipro University of Technology. – Dnipro: Lira ltd. PE, 2023. 192 pp. ISBN 978-966-981-786-0.

Papers in periodic professional editions of Ukraine:

2. Vlasov, V.S. Substantiating parameters of volumetric rock mass simulation in the neighbourhood of stopes and development mine workings / S.F. Vlasov & V.S. Vlasov // Scientific and technical journal «Mining of Mineral Deposits 2015» D.: NMU – *Litograf*, 2015. P. 367 – 375. <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/104658>.

3. Vlasov, V.S. Modeling of the earth's surface subsidence during its undermining by stopping in coal mines / A.S. Zelensky, V.S. Lysenko, M.A. Alekseyev, & V.S. Vlasov // *Naukovyi Visnyk NGU*, 2020. (6). P. 121 – 127. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/121>. (Scientific and metric base **Scopus**).

4. Vlasov, V.S. Automation of geological and surveying support to forecast hydroecological risks arising in the process of a coal mine closure / M.A. Alekseiiev, A.S. Kuchyn, & V.S. Vlasov // *Mining electromechanics and automation*. DUT, 2020. P. 44 – 51. ISSN 0201-7814.

Papers and abstracts:

5. Vlasov, V. Simulation of Rock Convergence in a Longwall / A.A. Sidelnikov, V.S. Vlasov, & V.E. Valyushko // The 6th International Forum for Students and Young Researches «Widening our horizon» Volume 2.D. (Dnepropetrovsk, April 14 –15); National Mining University, 2011. P. 53-54.

6. Vlasov, V.S. Modeling earth's surface subsidence in the process of a coal mine closure. / M.A. Alekseiiev, & V.S. Vlasov // 13th International conference

«Problems of information technology use in education, science, and industry». Collection of scientific papers # 3 (Dnipro, October 23-24, 2017); Dnipro University of Technology, 2017. P. 116 – 117. ISBN 978-966-350-692-0.

7. Vlasov V. Models and information systems of ecological and economical risks with decision making on the closure of coal mines / M. Alekseev, & V. Vlasov // *Physiochemical geotechnologies 2018: Materials of International Scientific and Practical Conference* (Dnipro, October 10-11, 2018); Dnipro University of Technology, 2018. P. 68. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/153333>.

8. Vlasov V.S. System supporting decisions made to minimize hydroecological and economic risks while surface undermining / M.A. Alekseev, & V.S. Vlasov // *Materials of International Scientific and Technical Conference «Progress of industry and society»* (Kryvyi Rih, May 22-24, 2019); SHEI «Kryvyi Rih National University», 2019. P. 126. <https://shorturl.at/gpsx0>.

9. Vlasov, V.S. Substantiating 3D simulation methods of the earth's surface deformation while coal seam extracting in the Western Donbas mines / M.A. Alekseev, & V.S. Vlasov // *Modern Movement of Science: abstracts of the 10th International Scientific and Practical Internet Conference* (Dnipro, April 2 – 3, 2020), 2020. P. 27 – 30. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2020/04/P-1>.

10. Vlasov, V.S. Automating a process to control hydroecosafety while synchronizing coal mining operations and shutting operations of mine fields / V.S. Vlasov // *International Scientific Internet Conference «Information Society: technological, economic, and technical aspects of formation»* (Ternopil, Ukraine – Przeworsk, Poland), July 6-7, 2023), 2023. P. 10 – 11. <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1240/>.

11. Vlasov, V.S. Computer modeling in the system controlling hydroecosafety of mine fields / V.S. Vlasov // *The 5th International Scientific and Practical Internet Conference «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates»*: Ukraine, Dnipro, August 3 – 4, 2023. P. 137 – 138. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/08/>.

Personal contribution of the applicant in the works published in in co-authorship: [1] analysis of information systems and software products intended to solve problems concerning control of hydrodynamic processes during mining; analytical substantiation and implementation of the software to develop 3D model of the watered mine field; [2] parameters of 3D rock mass modeling for the Western Donbas mines have been substantiated; [3] construction of geomechanical computer model and simulation of the earth's surface subsidence which helps identify both areas and volumes of the flooded surface; [4] development of methods to prepare data for automation of geological and surveying support forecasting geological and ecological risks as a result of a coal mine closure, and their simulation with the help of SAMARA software; [5] determination of convergence in longwall depending upon a stope line location; [6] formulation of the problem and determination of an algorithm as for minimization of hydroecological risks through simulation of the earth's surface subsidence in the process of a coal mine closure; [7] database of 3D coordinates for coal seam extraction has been developed for the specific mining and geological conditions of *Ternivska* mine (DTEK *Pavlohradvuhillia* PJSC; [8] methods have been developed to make decisions minimizing hydroecological and economic risks while coal mine liquidating. GIS systems (GRASS, gvGIS, QGIS, ArcGIS, and SAMARA) have been analyzed making it possible to construct models of the analyzed object; [9] substantiation of 3D methods to simulate the earth's surface deformation in the process of coal seam extraction in the Western Donbas mines; [10] substantiation of hydrogeomechanical parameters stipulating physical formation of hydrosafety risks while synchronizing coal mining operations and shutting them down based upon the development of sequence of physical and mathematical computer models as a tool to automate processes controlling hydroecosafety of coal extraction in the Western Donbas; and [11] development of the updated software with monitoring of dynamics of changes in the 3D computer model of aggregate of seams mined using longwalls to develop the automated system forecasting hydroecological risks in the process of a coal mine closure in the Western Donbas.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	34
ВСТУП.....	35
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ КЕРУВАННЯ ГІДРОЕКОБЕЗПЕКОЮ В МЕЖАХ ШАХТНИХ ПОЛІВ.....	44
1.1 Гідроекобезпека шахтних полів при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт.....	44
1.2 Аналіз інформаційних систем та програмного забезпечення, призначених для вирішення завдань керування гідрогеодинамічними та геомеханічними процесами при веденні гірничих робіт.....	56
1.2.1 Обґрунтування застосування програмного забезпечення для вирішення геофільтраційних задач.....	57
1.2.2 Обґрунтування застосування програмного забезпечення для вирішення маркшейдерських задач.....	63
1.3 Структурно-логічна схема виконання дослідження.....	72
Висновки за розділом.....	76
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛЬНОГО ВІДОБРАЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МАСИВУ ШАХТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ГІРНИЧИХ РОБІТ ТА ЇХ ЗГОРТАННЯМ ІЗ МІНІМІЗАЦІЄЮ НЕГАТИВНИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ.....	78
2.1 Емпірично-аналітичне дослідження параметрів водопровідного розрідження гірських порід під час розробки вугільних пластів	78

2.2	Аналітичний вибір методу оцінки параметрів керування геофільтрацією в порушеному гірничими роботами масиві шахтного поля.....	91
2.3	Ідентифікація модельних рішень і реальних геофільтраційних об'єктів методом електрогідродинамічних аналогій за даними натурних вимірювань і моделювання на еквівалентних матеріалах.....	96
2.4	Математична основа комп'ютерного моделювання процесу фільтрації підземних вод під час експлуатації та затоплення шахт.....	104
	Висновки за розділом.....	110
РОЗДІЛ 3	ГІДРОБЕЗПЕКА ПІДРОБКИ РЕГІОНАЛЬНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ В ЗАХІДНОМУ ДОНБАСІ.....	112
3.1	Оцінка проникаючої здатності бучацьких пісків.....	112
3.2	Дослідження механізму формування прориву водопіщаної суміші в гірничі виробки.....	118
3.2.1	Моделювання напружено-деформованого стану попередньо розшарованої водозахисної товщі.....	118
3.2.2	Експериментальні дослідження захисних властивостей гірських порід.....	123
3.2.3	Розрахунковий метод визначення розкриття тріщин розшарування в експериментальних свердловинах над гірничими виробками.....	128
3.3	Механізм формування аномальних водоприпливів.....	133
	Висновки за розділом.....	137
РОЗДІЛ 4	АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ І РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОБУДОВИ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ОБВОДНЕНОГО ШАХТНОГО ПОЛЯ.....	139

4.1	Обґрунтування методики прогнозування зрушень гірського масиву і земної поверхні у Західному Донбасі з використанням комп'ютерного моделювання.....	139
4.1.1	Загальні підходи до визначення параметрів зрушення гірського масиву і поверхні шляхом побудови комп'ютерних моделей.....	139
4.1.2	Характеристика обраного об'єкта досліджень (шахта «Тернівська»).....	143
4.1.3	Вихідні дані	144
4.2	Тривимірна модель підробленої земної поверхні.....	146
4.3	Програмне забезпечення для відображення наслідків вуглевидобутку і закриття шахт Західного Донбасу, що формують гідроризики на шахтному полі	152
4.3.1	Обґрунтування методики відображення модельної динаміки опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами на вугільних шахтах.....	152
4.3.2	Формування вимог для розроблюваного програмного забезпечення.....	162
4.4	Архітектура бази даних для програмного забезпечення	166
4.5	Реалізація розробленого програмного забезпечення у ролі дослідницької апробації.....	172
4.5.1	Розробка інтерфейсу програмного забезпечення для менеджера свердловин.....	174
4.5.2	Реалізація інтерфейсу програмного забезпечення для побудови моделі.....	177
4.5.3	Динаміка зміни площ та об'єму затоплення при поступовому відпрацюванні вугільних пластів.....	186
	Висновки за розділом.....	191

РОЗДІЛ 5 РЕАЛІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ОБГРУНТОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ЯК ІНСТРУМЕНТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ГІДРОЕКОБЕЗПЕКОЮ ВУГЛЕВИДОБУТКУ І ЗГОРТАННЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ.....	193
5.1 Фільтраційна комп'ютерна модель шахтних полів.....	193
5.2 Комп'ютерна модель суміжних шахт, що готуються до закриття в режимі синхронізації гірничих робіт та їх згортання.....	206
5.2.1 Аналіз особливостей гідрогеологічних умов та природно-техногенного режиму шахтних полів.....	206
5.2.2 Обґрунтування розрахункової гідродинамічної схеми.....	211
5.2.3 Ідентифікація комп'ютерної моделі геофільтрації шахтних полів і реального об'єкту.....	218
5.3 Результати комп'ютерного моделювання для різних варіантів синхронізації гірничих робіт і закриття суміжних шахт.....	226
5.4 Рекомендації щодо мінімізації гідроекологічних наслідків затоплення шахт у режимі синхронізації з гірничими роботами.....	235
5.5 Оцінка економічної ефективності використання оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля.....	238
5.6 Параметрична логістика для автоматизації процесів керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт та їх згортання.....	251
Висновки за розділом.....	254
ВИСНОВКИ.....	257
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	263
ДОДАТОК Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи.....	278

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЦРД – Центральний район Донбасу;

ЗВТ – зони водопровідних тріщин;

МСР – метод скінченних різниць;

МСЕ – метод скінченних елементів;

НДС – напружено-деформований стан;

АСК – автоматизована система керування;

КІТ – комп'ютерно-інтегровані технології;

БД – база даних;

ПЗ – програмне забезпечення;

СКБД – система керування базами даних;

ГІС – геоінформаційна система;

САМАРА – система автоматизації маркшейдерських робіт;

ПК – персональний комп'ютер;

ОПР – особа, яка приймає рішення;

СППР – система підтримки і прийняття рішень;

БПР – блок прийняття рішень;

МГЕР – менеджер гідроекологічних ризиків;

АСПКГ – автоматизована система процесів керування гідроекобезпекою.

ВСТУП

Актуальність теми. У зв'язку з прийнятим курсом уряду України на декарбонізацію та економічну диверсифікацію вугільної галузі планується у 2024 – 2025 роках закрити шахти «Степова» та «Ювілейна» ШУ «Першотравенське» до вже раніше закритих трьох із 10 у Західному Донбасі. Тому як ніколи постає питання гідроекобезпеки шахтних полів. Крім того, вуглепромисловий регіон Західного Донбасу за останні декілька десятків років є найбільш показовим за сукупністю проблем вуглевидобутку і синхронного згортання гірничих робіт у складних геолого-гідрологічних умовах. Загальна площа шахтних полів складає понад 500 км². На цій площі відбувається просідання земної поверхні, що сягає дев'яносто відсотків сукупних вийманих потужностей вугільних пластів, затоплення поверхні заплав річок, десятки мільйонів кубометрів відкачуваних щороку шахтних вод, висушені водозбори питної води, десятки тисяч тонн втраченого видобутку вугілля внаслідок зневоднення і знеміцнення гірських порід кам'яновугільної товщі і багато інших негативних факторів.

Нині розрахунок параметрів опускання земної поверхні, яка підроблена очисними роботами, виконується маркшейдерською службою тільки у разі підробки життєво важливих народногосподарських об'єктів. Щодо визначення гідроекологічних ризиків на момент закриття вугільних шахт відповідними службами шахт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» такі роботи не проводяться. По-перше, це пов'язано з недостатньою кваліфікацією фахівців у ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля», які б могли враховувати багатофакторність гідроекологічних ризиків, а по-друге, з відсутністю автоматизованих систем їх визначення і багатофакторністю умов розробки родовища вугілля, до яких відносяться: розміри шахтного поля, кількість пластів, що відпрацьовуються, зміна їх потужності, розміри та конфігурація виїмкових полів, глибина залягання вугільних пластів та ґрунтових вод, вплив гідродинамічних процесів та ін. Все це обумовлює необхідність розробки

системи параметричної логістики для автоматизації процесів керування гідроекобезпекою вуглевидобутку на шахтних полях. Для цього необхідно обґрунтувати гідрогеомеханічні параметри, що обумовлюють фізичне формування гідроризиків при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт на основі створення послідовності фізичних і математичних комп'ютерних моделей як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою у Західному Донбасі.

Тому розробка автоматизованої системи прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті шахт Західного Донбасу з урахуванням багатофакторної моделі та великого обсягу вихідних даних є актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» у відповідності з Національним планом дій в галузі енергетики до 2030 р. за № 687, скоригованим і затвердженим Міністерством енергетики та вугільної промисловості України у 2018 р., відповідає «Енергетичній стратегії України на період до 2030 року» (розпорядження Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №1071-р.) та «Загальнодержавній програмі розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року» (Закон України від 21 квітня 2011 року № 3268-VI) та ін.

Мета роботи полягає в створенні та впровадженні послідовності чисельних комп'ютерних моделей і програмного забезпечення як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою шахтних полів у Західному Донбасі для обґрунтування гідрогеомеханічних параметрів, що обумовлюють фізичне формування гідроризиків при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт.

Для досягнення поставленої мети в дисертації сформульовано і виконано наступні **задачі досліджень**:

1) Виконати аналітичний огляд можливостей керування гідроекобезпекою в межах шахтних полів.

2) Обґрунтувати та реалізувати методику модельного відображення гідродинамічних і геомеханічних процесів у масиві шахтного поля для автоматизації керування синхронізацією гірничих робіт та їх згортанням із мінімізацією негативних гідродинамічних явищ.

3) Виконати аналітичне обґрунтування методики моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами та розробку оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля щодо визначення зон і об'ємів затоплення поверхні землі для прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті шахт Західного Донбасу.

4) Виконати моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами і встановити закономірності зміни площі та об'ємів затоплення поверхні землі для прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті шахт Західного Донбасу.

5) Виконати реалізацію використання послідовності обґрунтованих моделей як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою вуглевидобутку і згортання гірничих робіт.

6) Виконати оцінку економічної ефективності використання оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля.

Об'єкт дослідження – процеси формування гідроризиків та система керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку і згортання гірничих робіт у Західному Донбасі.

Предмет дослідження – параметрична структура фізичних та математичних комп'ютерних моделей геофільтрації на шахтних полях Західного Донбасу і аналітичне обґрунтування програмного забезпечення тривимірного відображення динаміки гірського масиву, земної поверхні та рівневої поверхні підземних вод.

Основна ідея роботи полягає в автоматизації процесів керування гідроекобезпекою у Західному Донбасі шляхом використання логістичного ряду фізичних та математичних комп'ютерних моделей геофільтрації на шахтних полях і програмного забезпечення для тривимірного відображення динаміки гірського масиву, земної поверхні та рівневої поверхні підземних вод.

Методи дослідження. Для вирішення науково-технічного завдання використано комплексний підхід, що містить узагальнення практичного досвіду, наукових праць та розробок у досліджуваній області, аналітичні та експериментальні дослідження, фізичне та чисельне математичне моделювання складних гідродинамічних та геомеханічних процесів, методів тріангуляції, теорії ймовірностей і статистики. Аналітичні дослідження виконано на основі положень механіки гірських порід та підземних споруд, динаміки підземних вод, теорії чисельних методів.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Параметрична логістика автоматизації процесу керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт і їх згортання складається з послідовності геофізичних моделей вимірів деформацій у покрівлі рухомого очисного вибою, які відображають пружно-реологічну динаміку зрушень масиву до поверхні карбону з ядром повзучості Абеля та подальшим сполученням цього результату з геометричними розмірами зони фільтрації у вибої за вимірами на електрогідродинамічній моделі, що дозволяє аналітично узагальнити рівняння керуваності технічних систем у вигляді синтезу чисельних моделей геофільтрації і геомеханіки на основі комп'ютерних програм.

2. Математичне моделювання динаміки опускання поверхні шахтного поля в Західному Донбасі реалізується побудовою поверхонь з регулярною інтерполяційною і поліноміальною мережами, причому просторова інтерполяція ґрунтується на аналітичному виборі моделі поверхні і подальшою її деталізацією локальною інтерполяцією за вимірами навколо кожної точки, а порівняння суми елементарних призм по кожному вузлу мережі з поверхнею

грунтових вод і водоймищ дозволяє знайти контури площ підтоплення і затоплення у прибережних зонах з описом динаміки їхньої зміни у просторі і часі на скінченно-різницевих багат шарових моделях геофільтрації з відображенням нестационарного гідродинамічного балансу, показники якого є модельними параметрами гідроекопорушень масиву і його стабілізації за варіантним рядом керуючих інженерних рішень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Вперше доведено, що складання методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля з автоматизацією процесу керування гідроекобезпекою конкретизується фізичним моделюванням та емпіріоаналітичними обґрунтуваннями і математичним описом елементів побудови послідовності комп'ютерних моделей.

2. Вперше за геофізичними вимірами деформації надвугільної товщі у свердловинах над рухомим очисним вибоєм отримано графіки параметрів деформування гірських порід у часі, які інтерпретовані за класичним рівнянням з ядром повзучості Абеля з новим фізичним змістом, як параметри пружно-реологічної піддатливості масиву, що необхідно для тлумачення нелінійності фільтраційних геомеханічних змін у моделях та разом з доказом гідростатичного розподілу напружень у подошві бучацького водоносного горизонту. Це дозволяє використати комп'ютерно-інтегровані технології для моделювання фільтраційних збурень, які спричиняють практично рівномірне переміщення центральних і периферійних точок з об'ємом мульди зсуву, рівним об'єму водовмісного піщаного матеріалу та сформують нове фізичне уявлення водозахисних функцій масиву.

3. Вперше імітаційний пошук параметрів проникності зони підробки очисним вибоєм здійснено аналоговим моделюванням на резисторній електрогідродинамічній моделі та співставленням результатів з параметрами розтікання води в лаві, що дозволяє дійти висновку про паралельне застосування горизонтальних і зсувних деформацій при інтегруванні чисельних моделей, а математичною основою комп'ютерного моделювання процесу геофільтрації

при експлуатації та затопленні шахт є чисельне розв'язання рівняння несталої планової фільтрації за явно-неявною схемою, коли є дотримання потокового балансу по всій області моделі.

4. Удосконалено обґрунтування гідробезпеки регіонального водоносного горизонту в Західному Донбасі і показано, що навколо розкритої тріщини у гірській породі утворюється захисна зона «зворотний фільтр», з якої вимиваються дрібні фракції піску, а крупні утворюють захисну зону за співвідношенням $d_{50}/d_{10} > 2$, де d_{50} та d_{10} є діаметрами фракцій з відповідним вмістом у водоносному горизонті 50 % і 10 %, що дозволяє підвищити якість геофільтраційної моделі при використанні комп'ютерно-інтегрованих технологій.

5. Розширено уявлення про фізичні параметри підробки водонасичених пісків, коли доступ до вимірів розкриття тріщин відсутній, знайдено емпіріо-аналітичне тлумачення логарифмічної лінеаризації залежності між проникністю підробленої товщі порід і кратністю підробки, що з урахуванням отриманих ймовірнісних показників зернового складу бучацького піску дозволило гарантовано виявити існуючий резерв захисних властивостей аргілітів та алевролітів у Західному Донбасі, який дорівнює 3,0.

6. Удосконалено обґрунтування й апробовано методику моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами в умовах шахт Західного Донбасу, при цьому запропоновано математичну модель побудови поверхонь з регулярною мережею – інтерполяційна і поліноміальна, які дозволяють отримати адекватне уявлення про поверхні, а також вони є базисом для підрахунку об'ємів, наведених у вигляді суми елементарних призм по кожному вузлу мережі, що дозволяє приймати управлінські рішення щодо зменшення фінансового навантаження на вугледобувне підприємство під час його закриття.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується коректністю постановки завдань, використанням апробованих методів досліджень, таких як чисельне моделювання склад-

них гідрогеомеханічних систем з ідентифікацією об'єктів і моделей, методів триангуляції, теорії ймовірностей і статистики, а також збіжністю результатів моделювання з інструментальними вимірами.

Наукове значення роботи полягає у створенні науково-методичного підходу до побудови логістичної послідовності фізичних і комп'ютерних моделей, які у сукупності дозволяють автоматизувати керування гідроекобезпекою шахтних полів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Створено та впроваджено послідовність чисельних комп'ютерних моделей і програмного забезпечення як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою шахтних полів у Західному Донбасі.

2. Розроблено математичний і алгоритмічний апарат, який дозволив створити ефективні моделі земної поверхні і водоносного горизонту, а також визначити об'єм між початковою земною поверхнею, що осіла, а також між водоносним горизонтом і поверхнею, для визначення ділянок затоплення.

3. Розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє автоматизувати прогнозування гідроекологічних ризиків на площах, де формуються мульди осідання денної поверхні в прибережних зонах річок (Програмне забезпечення моделювання поверхонь виконано на мові Visual C++ під операційну систему Windows з використанням інструментальних засобів відкритої графічної бібліотеки OpenGL).

4. Розроблений графічний інтерфейс враховує аналіз поведінки цільового користувача й останні тенденції в сфері User Experience.

5. Розроблено постійнодіючу геофільтраційну комп'ютерну модель шахтних полів Західного Донбасу, яка відображає динаміку балансу підземних та поверхневих вод і є базовою для вирішення завдань керування гідроекобезпекою окремих шахт.

6. Виконано оцінку економічної ефективності використання оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля.

Особистий внесок автора полягає у формуванні наукового завдання, мети й основних задач, обґрунтуванні наукових положень. Автором проведено аналіз літературних джерел за темою дисертаційної роботи; обґрунтовано методи дослідження; виконано розрахунково-експериментальні дослідження, статистичну обробку даних та їх аналіз, розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє автоматизувати прогнозування гідроекологічних ризиків на шахтних полях.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, виконані в дисертаційній роботі, доповідались, обговорювались та отримали схвалення на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях і форумах: The 6th International forum for students and young researches «Widening our horizon» Volume 2.D. (Dnepropetrovsk, 14 –15 April 2011); XIII міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості» (Дніпро, 23 – 24 листопада 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-хімічна геотехнологія» (Дніпро, 10 – 11 жовтня 2018); Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 22 – 24 травня 2019); The 10th International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, 2 – 3 april, 2020); Міжнародній науковій інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення», (Тернопіль, Україна – Перевоськ, Польща, 6 – 7 липня 2023); The 5th International scientific and practical internet conference «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates» (Dnipro, 3 – 4 August 2023).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 11 наукових праць, у тому числі монографія, 3 статті у фахових виданнях, одна з яких індексована у наукометричній базі даних Scopus, 7 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 130

найменувань на 15 сторінках. Робота містить 247 сторінок основного тексту, 90 рисунків та 25 таблиць, загальний обсяг – 279 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МОЖЛИВОСТЕЙ КЕРУВАННЯ ГІДРОЕКОБЕЗПЕКОЮ В МЕЖАХ ШАХТНИХ ПОЛІВ

1.1 Гідроекобезпека шахтних полів при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт

Видобуток корисних копалин є необхідним для ефективного розвитку різних галузей промисловості, забезпечуючи будівництво, виробництво, енергетичні підприємства необхідною сировиною. Окрім вигоди для різних сфер виробництва видобуток корисних копалин є важливим для держави з огляду на надходження від сплати податків, рівня зайнятості місцевого населення та розвитку малих урбанізованих структур.

Попри значні позитивні екстерналиї при освоєнні родовищ корисних копалин підземним способом існують й негативні впливи. Одним з таких є пошкодження природних ресурсів, а саме земельних ділянок, які обмежені гірничим відводом, порушенням гідродинаміки підземних вод, їх якості для забезпечення питною водою населення. Зазвичай гірничодобувна діяльність спричиняє згубний вплив, а інколи й незворотню шкоду цім землям. Підготовка до видобутку корисних копалин, побудова комунікацій, промислових майданчиків часто призводять до вирубки лісів, знищення цінних екосистем і місць проживання багатьох видів тварин та біорізноманіття.

Крім того, видобуток корисних копалин може сприяти ерозії ґрунту та втраті його верхнього шару. Ці процеси піддають землю ерозії вітром і водою, виснажуючи родючий верхній шар ґрунту, необхідний для сільськогосподарської діяльності. Також видобуток корисних копалин може спричинити просідання земної поверхні при вийманні вугільних пластів, яка може бути затоплена при закритті шахт мокрим способом.

Після завершення видобутку вугледобувне підприємство має розпочати процес відновлення земельних ділянок, який є вирішальним для збереження

навколишнього середовища. Проведення цих робіт може вплинути на відновлення екосистеми та сприяти поверненню місцевих тварин, що дозволить підтримувати баланс екосистем і виживання видів біоти, які перебувають під загрозою зникнення.

Процес відновлення земельних ділянок є вартісним та тривалим. Сукупна вартість відновлення може бути значно більшою ніж вигоди, які можна отримати після цього процесу. Якщо витрати значно великі, землі можуть не відновлюватись до рівня близького до природнього, наприклад для ведення сільськогосподарських робіт, а можуть бути використані для інших цілей – лісового господарства, риболовлі чи сінокосіння і випасання худоби.

Необхідно відмітити, що у період завершення життєвого циклу існування вугледобувного підприємства підняття питань відновлення ділянок та повернення їх до власника є вкрай важливим, оскільки цей етап буде проводитись у той час, коли на підприємстві ще є відповідні технологічні, технічні засоби та фінансові ресурси для його проведення. Це дозволить зменшити витрати на оренду земельних ділянок, оскільки частину з них можна повернути раніше, не чекаючи періоду повного закриття шахти та підтоплення відповідних ділянок.

У зв'язку з прийнятим курсом уряду України на декарбонізацію та економічну диверсифікацію вугільної галузі планується у 2024 – 2025 рр. закрити шахти «Степова» та «Ювілейна» ШУ «Першотравенське» до вже раніше закритих трьох шахт із 10 у Західному Донбасі, як ніколи постає питання гідроекобезпеки шахтних полів. Ліквідація шахт супроводжується значними негативними гідроекологічними наслідками, основними з яких є: деформація земної поверхні, підтоплення, заболочування земель та ін. З огляду на те, що 11 шахт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» займають понад 500 км², масштаб екологічних наслідків після закриття шахт може бути катастрофічним.

Необхідно відзначити, що при відпрацюванні родовищ корисних копалин підземним способом з повним обваленням виробленого простору не тіль-

ки в Україні, а у й світі техногенні зміни підземної та поверхневої гідросфери мають схожі ознаки. Вони проявляються у формуванні на земній поверхні мульд осідання та зон підтоплення і затоплення, кількісних та якісних порушень в експлуатації питних водозаборів, забрудненні ґрунтових вод за рахунок виходу на поверхню високомінералізованих підземних вод, інфільтраційних втрат зі ставків-накопичувачів шахтних вод та ін.

За даними Державної служби геології та надр України [1], загальна площа підроблених гірничими виробками земель перевищує 5,5 тис. км², де зафіксовано осідання та зрушення над підземними виробками на площі понад 2, 4 тис. км², з них підтоплених є близько 142 км² (табл. 1.1) [2]. За даними, наведеними в табл. 1.1, Дніпропетровська область, на території якої розташовані запаси вугілля Західного Донбасу, займає третє місце за більшістю показників після Донецької та Луганської областей, а за загальною площею підтоплення в межах осідання – друге (46,56 км²), або понад 9 % від загальної площі всього родовища, і це в той час, коли активний процес закриття шахт тільки розпочався. Максимальна глибина осідання земної поверхні становить 5 м.

На території Західного Донбасу сформувалась мульда зрушення земної поверхні, яка в межах заплави р. Самари затоплена і має розглядатися як водний об'єкт [3]. За безпосереднього скидання шахтних вод у заплаву утворились водойми площею понад 25 км² з мінералізацією води 5,8 – 7,9 г/дм³ [4] – [6].

У Червоноградському гірничопромисловому районі вже під час експлуатації шахт на підтоплені площі припадало понад 25 % території [7]. У межах полів шахт № 5 та шахти «Межирічанська» значення просідання на окремих ділянках перевищують 3,2 – 3,5 м [8]. Внаслідок цього утворилося нове русло р. Західний Буг та виникло озеро площею понад 10 га. Високі значення просідання (понад 2,0 – 2,5 м) зареєстровано також у межах полів шахт «Відродження», «Візейська», «Бендюзька», «Зарічна» [2].

Таблиця 1.1 – Відомості щодо осідання підробленої земної поверхні

Назва адміністративної області	Площа підробленої території, км ²	Загальна площа осідання земної поверхні, км ²	Глибина осідання, м	Площа осідання на забудованій території, км ²	Загальна площа підтоплення в межах осідання, км ²
Донецька	2417,00	2 152,00	0,02 – 6,8	–	90,00
Луганська	2200,00	–	5,0 – 7,0	703,80	–
Дніпропетровська	720,83	156,11	0,7 – 5,0	22,35	46,56
Львівська	177,00	100,00	0,01 – 0,4	19,50	5,00
Івано-Франківська	1,60	0,30	0,1 – 2,1	0,20	0,15
Волинська	–	26,20	2,5 – 3,0	–	–
Кіровоградська	–	10,00	3,0 – 3,5	–	–
Усього	5516,43	2444,50	0,01 – 7,0	745,85	141,71

Не менш важливими для гідроекобезпеки є забруднення джерел питної води високомінералізованими підземними водами. Наприклад, багаторічне скидання високомінералізованих хлоридних вод шахти «Пролетарська» в б. «Світлична» призвело до зміни якісного складу підземних вод Світличанського водозабору, який є основним джерелом питного водопостачання Стаханівської та Брянківської техногенно-промислових агломерацій у Північно-Східному Донбасі. Це стало причиною перевищення норм ГДК за мінералізацією у 2 рази (2,1 г/дм³) та загальною жорсткістю – у 3 рази (22,0 ммоль/дм³) [9].

Скидання та акумуляція відходів вуглезбагачення шахт Західного Донбасу відбувається у хвостосховище, що розташоване в глибокому ерозійному врізі в б. «Стуканова», з мінералізацією 4,6 – 21,5 г/дм³. Під дією інфільтрації зі хвостосховища сформувався ореол забруднення площею 1,09 км² на глибину до 25 м. Мінералізація підземних вод берекських відкладів становить 3,8 г/дм³, вміст хлоридів – 2,2 г/дм³. У підземних водах межигірських відкладів мінералізація досягла величини 3,4 г/дм³, а вміст хлоридів та нітратів склав, відповідно, 1,9 г/дм³ та 0,5 г/дм³ [2], [5], [10].

Видобуток запасів вугілля неминуче наближає стадію згортання гірничих робіт. Для позначення періоду, наступного за періодом відпрацювання родовища, використовують різні терміни: регресивна (пасивна) стадія техногенезу, постмайнінг, стадія ліквідації шахти, постексплуатаційна стадія, поствідпрацювальний період, згортання гірничих робіт [11] – [14]; в іноземній літературі – post-mining, reclamation (англ.), Nachbergbau, Nachhaltiger Bergbau, Altbergbau (нім.) [2], [15] – [19].

Проект закриття і ліквідації вугільного підприємства розробляється на основі нормативно-правових документів та передбачає відповіді на питання технічного, екологічного і соціально-економічного характеру [12] – [14]. Згідно «Стандарту...» [12] технічні рішення визначаються, головним чином, за результатами гідрогеологічного прогнозу наслідків затоплення шахти в техногенно змінених умовах. Процес згортання гірничих робіт і ліквідація вугільної шахти відбувається в умовах змінених меж водообміну, фільтраційних та ємнісних параметрів масиву, осідання земної поверхні, гідрохімічної інверсії та ін. [2]. Також необхідно враховувати і те, що родовище Західного Донбасу відпрацьовувалося 11 шахтами, з яких шахта «Першетравнева» вже кілька років як виведена з експлуатації, а процес закриття наступних шахт необхідно розглядати в комплексі з працюючими. Тому не менш важливим питанням є синхронізація вуглевидобутку та згортання гірничих робіт, що значно ускладнює визначення гідрогеомеханічних параметрів, які зумовлюють фізичне формування гідроризиків.

Виходячи з вищесказаного можна дійти висновку, що гірничодобувні підприємства, які здійснюють підземну розробку корисних копалин, є складною системою керування гідроекобезпекою в межах шахтних полів, яка залежить від багатьох факторів. Їх можна поділити на дві основні групи: 1 – геомеханічні, 2 – гідрогеодинамічні. До першої відносяться такі основні процеси як порушення, зсув та просідання масиву гірських порід – видозмінені від початкового стану шахтного поля. До другої – процес геофільтрації техногенного середовища шахтних полів.

Саме ці процеси мають найбільший вплив на основні етапи життєвого циклу гірничого підприємства (експлуатація та закриття). На думку дослідників [20], вони у процесі підземного видобутку вугілля викликають один з найбільш масштабних типів техногенезу, який за інтенсивністю та глибиною перетворень можна порівняти з геогенезом.

У широкому розумінні техногенез – це сукупність інженерно-геологічних, геоморфологічних і геохімічних процесів у земній корі, пов'язаних з виробничою діяльністю людини. Він полягає у перетворенні біосфери, що викликається сукупністю механічних, геохімічних та геофізичних процесів [21]. Прояв техногенезу зводиться до таких основних наслідків: зміна водного режиму (поверхневого та підземного), порушення поверхні (зсуви та просідання); зміна мікроклімату, умов існування і розвитку біологічного світу та ін. Найбільші масштаби таких порушень супроводжують розробку корисних копалин підземним способом. При цьому складні екологічні питання виникають як під час експлуатації, так і консервації або ліквідації відпрацьованих шахт [22], [23]. Виникає питання, – що є первинним, а що вторинним? Безсумнівно, на першому місці стоять геомеханічні процеси, пов'язані з переміщенням великих мас гірських порід під час проведення гірничих виробок і видобутку вугілля в очисних вибоях. Вони викликають порушення як геомеханічної, так і гідродинамічної рівноваги та зумовлюють технологію відпрацювання шахтних полів. Усі ці процеси характерні для першої стадії активного техногенезу, що характеризує експлуатаційний етап гірничого підприємства.

Під час консервації або ліквідації відпрацьованих шахт та за відсутності активних технічних дій відбувається відновлення як геомеханічного, так і гідродинамічного стану масиву гірських порід. Комплекс геологічних процесів, які протікають при цьому, відповідає другій стадії техногенезу і носить успадкований характер. При цьому повне відновлення геосистеми в початковий стан неможливе у зв'язку з незворотною порушеністю гірського масиву. Всі геомеханічні та гідродинамічні процеси відбуваються у масиві гірських порід одночасно як у часі, так і просторі, і тому тісно пов'язані один

з одним. Все це зумовлює необхідність розглядати геомеханічні та гідродинамічні процеси в масиві гірських порід на всіх етапах життєвого циклу вугільних шахт як одну з основних складових геотехнічних систем – гідрогео-механіку.

Питаннями дослідження оптимальних шляхів та методів керування станом гірського породного масиву, механізмів та закономірностей проявів геомеханічних процесів займалися такі провідні вчені як: Бондаренко В.І., Гапєєв С.М., Зборщик М.П., Ковалевська І.А., Садовенко І.О., Сдвижкова О.О., Скіпочка С.І., Четверик М.С., Шашенко О.М. та ін. [24] – [29].

Оцінці факторів формування водоприпливів у гірничі виробки та розробки прогнозної методики розрахунку обводнення шахт в умовах вугільних родовищ Західного Донбасу присвячені роботи вітчизняних науковців: Блинова П.В., Григоровича В.А., Загриценко А.М., Інкіна О.В., Лівшиця І.Г., Огняника М.С., Пасічного В.Г., Подвігіної О.О., Приходько В.О., Рудакова Д.В., Садовенка І.О., Тимощука В.І., Шагоянца С.О., Шестопалова В.М., Шинкаревського М.О., Яковлева Є.О. та ін. [30] – [33], [34] – [36].

Дослідження процесів опускання земної поверхні під час виймання корисних копалин очисними роботами є суто маркшейдерським завданням, вирішенню якого присвячені роботи Андрощука О.В., Бабій К.В., Кучина О.С., Озерова І.Ф., Петрука Е.Г., Сидоринка В.Д., Четверика М.С. [37] – [40].

Дослідження теоретичних та прикладних аспектів гідрогеоecологічних проблем знайшли відображення у роботах Беседи М.І., Бондаря О.І., Огняника М.С., Пасічного В.Г., Рудакова В.К., Рудька Г.І., Ситникова А.Б. та ін. [41] – [44].

Безсумнівним є те, що ці вчені досягли значних результатів досліджень будь то геомеханіка, гідродинаміка гірського масиву, маркшейдерія чи гідроеcологічні проблеми розробки корисних копалин.

У поданій дисертаційній роботі зроблено спробу об'єднання всіх цих напрямів досліджень, що обумовлює необхідність використання величезного масиву даних, які, по-перше, необхідно було отримати від досліджуваних

об'єктів, а по-друге, розробити таку систему їх використання, яка б дозволяла вирішити поставлені завдання з мінімальними витратами часу та максимальною ефективністю.

Безсумнівно, це завдання неможливо вирішити без автоматизації процесу керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку та згорання гірничих робіт у Західному Донбасі, що зумовлює необхідність використання комп'ютерно-інтегрованих технологій (КІТ), фізичних та математичних моделей.

Нині розрахунок параметрів опускання земної поверхні, яка підроблена очисними роботами, виконується маркшейдерською службою тільки у разі підробки життєво важливих народногосподарських об'єктів. Для цього обладнуються наглядові станції в зоні підробки поверхні землі (рис. 1.2).

Характеристики наглядових станцій фіксують у журналі, фрагмент якого наведено у табл. 1.2. Маркшейдерська служба шахти залежно від вирішуваного завдання періодично знімає показники максимального осідання земної поверхні в зоні підробки, результати яких також заносяться до журналу, фрагмент якого наведено у табл. 1.3.

За результатами виконаних вимірювань робиться розрахунок імовірних зрушень та деформацій за формулою

$$\eta = 0,9 (m_1 + m_2 + \dots + m_n) \cos \alpha,$$

де m_1, m_2, \dots, m_n – потужність пласта, м;

n – кількість пластів, прийнятих до розрахунку;

q_0 – значення відносного максимального осідання земної поверхні – 0,9;

α – кут падіння пласта, град.

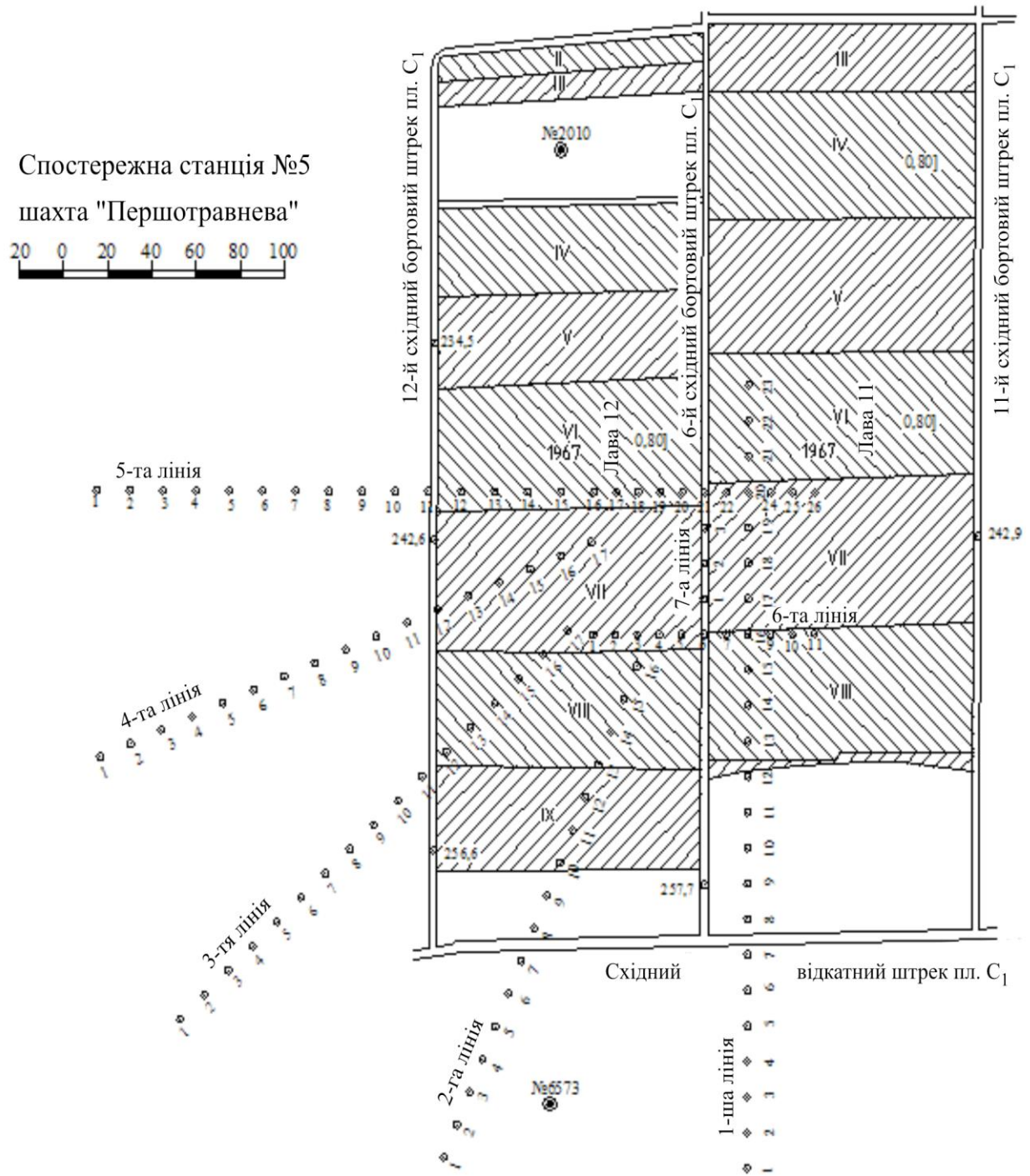


Рисунок 1.2 – План наглядної станції №5 шахти «Першотравнева»

Таблиця 1.2 – Характеристика спостережних станцій, закладених на шахтах Західного Донбасу

№ станції	Найменування шахти	Кількість профільних ліній	Кількість реперів	Кількість спостережень	Глибина підробки, м	Потужність наносів, м	Потужність пласта, м
2	«Тернівська»	3	208	19	130 – 200	70 – 90	0,74 – 0,92
5	«Першотравнева»	7	121	11	140 – 190	75 – 100	0,80
9	«Ювілейна»	2	130	34	170 – 300	70 – 80	0,70 – 0,72

Таблиця 1.3 – Значення відносних максимальних осідань за профільними лініями спостережних станцій

№ станції	Підробка	Лінія	Потужність пласта, м	Максимальне осідання, мм	Відносне максимальне осідання, q_0
3		9	0,85	767	0,90
4	Повторна 2 пл.	1	1,50	1315	0,88
4	Повторна 2 пл.	2	1,50	1315	0,88
5		1	0,80	700	0,88
5		5	0,80	706	0,88

За результатами обчислень будуються графіки осідання підробленої земної поверхні за відповідними профільними лініями.

Безперечною перевагою цього способу є точність визначення максимальних осідань підробленої земної поверхні. Основними недоліками є висока трудомісткість формування вимірних станцій, відповідні трудові, матеріальні та тимчасові ресурси і, як наслідок, локальність завдань, що вирішуються. Тому відповідними службами шахт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» не

проводяться роботи з визначення та прогнозування гідроекологічних ризиків на момент закриття вугільних шахт. Це пов'язано з відсутністю висококваліфікованих наукових кадрів, автоматизованих систем їх визначення і багатofакторністю умов розробки родовища вугілля, до яких відносяться: розміри шахтного поля, кількість пластів, що відпрацьовуються, та зміна їх потужності, розміри і конфігурація виїмкових полів, глибина залягання вугільних пластів та ґрунтових вод, геофільтраційні процеси та ін. На даний момент такі можливості мають тільки окремі кафедри НТУ «Дніпровська політехніка» та НДІ.

Тому розробка автоматизованої системи керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт у Західному Донбасі з урахуванням багатofакторної моделі і великого обсягу вихідних даних є актуальним науковим завданням.

Під автоматизацією системи керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт у Західному Донбасі розуміється система, що забезпечує керування процесом формування і обробки гідрогеомеханічних та маркшейдерських даних за допомогою комп'ютерно-інтегрованої технології, що дозволяє приймати рішення щодо мінімізації гідроекологічних ризиків, пов'язаних як із синхронізацією роботи діючих і шахт, що закриваються, так і з опусканням земної поверхні при її підробці очисними роботами та можливому її затопленні при закритті підприємства.

Під комп'ютерно-інтегрованою технологією розуміється використання логістичного ряду фізичних та математичних комп'ютерних моделей геофільтрації на шахтних полях і програмного забезпечення (ПЗ) тривимірного відображення динаміки гірського масиву, земної поверхні та рівневої поверхні підземних вод як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою у Західному Донбасі з урахуванням комп'ютерної техніки.

Значний внесок у дослідження автоматизації процесів керування, комп'ютерного моделювання та прогнозування у гірничому виробництві внесли Алексєєв М.О., Бубліков А.В., Горбійчук М.І., Жуковський В.В.,

Зеленський О.С., Лисенко В.С., Мещеряков Л.І., Прядко Н.С., Ткачов В.В., Удовик І.М., Уліцький О.А., Фраш Г., Юрчишин В.М., Яцишин М.М., Яланський О.А. та ін. [2], [45] – [51].

Виконавши аналіз факторів гідроекобезпеки шахтних полів при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт у Західному Донбасі можна зробити висновок, що Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» має потужний склад фахівців, що дозволяє під їх керівництвом на високому науковому рівні вирішити поставлені в дисертаційній роботі завдання.

Розробка автоматизованої системи керування гідроекобезпекою шахтних полів у Західному Донбасі дозволить приймати ефективні інженерні рішення не тільки при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт, але й прогнозувати гідроекологічні ризики на площах, де формуються мульди осідання денної поверхні в прибережних зонах річок з їх економічною оцінкою.

В основі прийняття рішень з керування гідродинамікою шахтного поля має бути чітке уявлення про умови, процеси і фактори, що впливають на формування природного і техногенного режиму підземних вод родовища. Останній має певні особливості і закономірності на кожній стадії функціонування гірничодобувного підприємства. Для цього необхідно розробити комп'ютерно-інтегровану технологію, що дозволить використовувати логістичний ряд фізичних та математичних комп'ютерних моделей геофільтрації на шахтних полях і програмне забезпечення тривимірного відображення динаміки гірського масиву, земної поверхні та рівневої поверхні підземних вод як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою у Західному Донбасі з урахуванням комп'ютерної техніки.

1.2 Аналіз інформаційних систем та програмного забезпечення, призначених для вирішення завдань керування гідрогеодинамічними та геомеханічними процесами при веденні гірничих робіт

Існуючі системи і технології, що використовують для вирішення завдань у гірничодобувній промисловості, загалом, не прийнятні для дослідження і прогнозу гідроекологічних ризиків. Водночас, їх можна використовувати для визначення будь-яких параметрів, проведення попереднього аналізу і прогнозування цих ризиків та як базу для створення нової інформаційної комп'ютерно-інтегрованої технології.

При вирішенні задачі моделювання процесів, що виникають при функціонуванні й закритті видобувних шахтних комплексів і протікають у просторі та часі, дуже важливо правильно вибрати інструментарій, що адекватно трансформує в необхідну форму, представляє, а також аналізує набори даних предметної області. Таким чином, на даному етапі основною проблемою є складність вибору з відомих інформаційних технологій, систем і програмного забезпечення таких, які могли б забезпечити виконання всіх етапів моделювання на основі наявних даних без необхідності їх додаткової обробки. Здійснення такого вибору є досить складним завданням, оскільки наразі існує широкий спектр інформаційних технологій, систем і програмного забезпечення, які спрямовані на вирішення проблем моделювання процесів у різних областях [52]. Для того, щоб прийняти правильне рішення, слід виконати аналіз особливостей найбільш відомих програмних комплексів і використовуваних ними даних, а також можливостей їх застосування в означеній предметній області. При цьому необхідно враховувати те, що при виборі програмного забезпечення для вирішення завдання автоматизації процесів керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт із мінімізацією негативних гідродинамічних явищ вони мають вирішувати:

1. Геофільтраційні задачі – при побудові моделі процесу фільтрації підземних вод під час експлуатації та затоплення шахт.

2. Маркшейдерські задачі – при побудові моделей динаміки зміни площ та об'єму затоплення при поступовому відпрацюванні вугільних пластів.

Оскільки досліджувана область характеризується складною структурою взаємодіючих компонентів, тому до вибору програмного забезпечення висуваються такі вимоги:

1. Необхідно аналізувати різноманітні компоненти процесів, пов'язаних з опусканням денної поверхні (геомеханічні, гідродинамічні, гідрологічні, екологічні та ін.). Досліджувані процеси характеризуються високою динамікою протікання.

2. Усі компоненти повинні бути пов'язані між собою.

3. Треба враховувати, що програмні продукти спрямовані на вирішення завдань у різних областях дослідження, через що необхідно розглядати декількох їх категорій.

4. Для вирішення завдань керування моделюванням геофільтраційних процесів необхідно, щоб програмне забезпечення підтримувало модулі з використанням методів скінченних елементів.

Таким чином, на даний момент можна виділити, низку комерційних і некомерційних програмних комплексів, які присутні на ринку, а саме:

1. Для вирішення *геофільтраційних задач*: MODFLOW; FEFLOW; GMS.

2. Для вирішення *маркшейдерських задач*: GRASS; gvGIS; qGIS; ArcGIS; ILWIS GIS; uDIG; САМАРА.

1.2.1 Обґрунтування застосування програмного забезпечення для вирішення геофільтраційних задач

При виборі програмного забезпечення необхідно виконати аналіз його області використання (можливостей), переваги та недоліки з метою визначення:

- типу дистрибуції;
- можливості підтримки растрових форматів;
- можливості підтримки векторних форматів;
- наявність самописних модулів;
- наявність детально описаної документації.

1. MODFLOW – була розроблена Геологічним дослідницьким центром США (USGS) і знаходить широке застосування в усьому світі, включаючи Україну. Вона є однією з найпоширеніших програм для гідрогеологічного моделювання та ресурсного керування водними ресурсами [53] – [54].

Програма моделює рух підземних вод у багат шаровому гідрогеологічному середовищі, здатному враховувати різноманітні фактори, такі як гідрогеологічні характеристики, кліматичні умови, джерела забруднення та водозабірні об'єкти. Вона основана на чисельних методах, таких як скінченні елементи або скінченні різниці, програма забезпечує точні результати та дозволяє прогнозувати зміни рівнів ґрунтових вод, потоків та забруднення води в підземних водах з різною просторовою та часовою роздільною здатністю.

Переваги:

- гнучкість і широкий спектр застосування для моделювання різних гідрогеологічних систем;
- надійність і перевірена точність, яка підтверджується ретельним тестуванням та валідацією спільнотою гідрогеологів;
- зручний інтерфейс та документація, що полегшує роботу з програмою;
- підтримка розподілених обчислень, що дозволяє ефективно моделювати великі та складні гідрогеологічні системи.

Недоліки:

- користувачі повинні мати достатні знання з гідрогеології, гідрології та чисельних методів, щоб ефективно використовувати програму, що може стати перешкодою для початківців;

- обмежена підтримка несучої реалістичності через те, що MODFLOW, як і більшість математичних моделей, базується на спрощених припущеннях;
- моделювання великих високодеталізованих гідрогеологічних моделей може вимагати значних обчислювальних ресурсів та часу;
- використання обмежень на деяких територіях може виявитись менш ефективним у деяких геологічних умовах або при моделюванні специфічних гідрогеологічних ситуацій.

2. FEFLOW – програма для чисельного моделювання гідрогеологічних та гідрологічних процесів у підземних водах. Вона, як і MODFLOW, використовує метод скінченних елементів для дослідження різноманітних проблем, таких як розтікання підземних вод, взаємодія з поверхневими водами, забруднення підземних вод та процеси водопостачання і дренажу [55] – [56].

Переваги:

- має потужний і гнучкий інтерфейс, який дозволяє створювати складні та реалістичні моделі підземних вод з різними геологічними умовами та гідрологічними процесами;
- застосування методу скінченних елементів дозволяє отримувати точні результати, особливо при моделюванні складних гідрогеологічних систем зі змінними властивостями ґрунту;
- візуалізація результатів з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом візуалізації;
- підтримка розподілених обчислень: FEFLOW може працювати на розподілених обчислювальних системах, що дозволяє розподіляти обчислювальне навантаження та прискорювати процес моделювання великих систем.

Недоліки:

- складність в освоєнні: для повного розуміння та використання усіх можливостей програми потрібні високі знання з гідрології, чисельних методів та математичного моделювання;

- моделювання складних гідрогеологічних систем може вимагати значних обчислювальних ресурсів, що обмежуватиме його застосування на менш потужних комп'ютерах;

- використання методу скінченних елементів може збільшувати час обчислень, особливо для великих та деталізованих моделей;

- FEFLOW є комерційною програмою і ліцензія може бути доволі вартісною, що буде обмеженням для деяких користувачів;

- обмежена підтримка для деяких регіонів та гідрогеологічних умов.

3. «Groundwater Modeling System» (GMS) – програмний комплекс для гідрогеологічного моделювання підземних вод, створений компанією Aquaveo. GMS надає інструменти для створення, візуалізації та аналізу гідрогеологічних моделей з використанням різних чисельних методів, включаючи скінченні елементи, скінченні різниці та аналітичні методи. Програма є інструментом для дослідження руху та взаємодії води в підземних водах, забруднення підземних вод, планування керування водними ресурсами та інженерних рішень у гідрогеології [57] – [58].

Переваги:

- інтеграція з геоінформаційними системами (ГІС): GMS дозволяє імпортувати та ефективно використовувати дані з ГІС, що полегшує процес створення гідрогеологічних моделей з використанням реальних геопросторових даних;

- програма надає можливість використовувати різні чисельні методи, такі як скінченні елементи, скінченні різниці та аналітичні методи;

- GMS має зручний та простий у використанні інтерфейс, який дозволяє швидко засвоювати основні функції програми, знижуючи поріг входження для нових користувачів;

- велика спільнота користувачів, що дозволяє отримати підтримку, поради та рішення технічних питань від інших фахівців;

– GMS дозволяє візуалізувати результати моделювання у вигляді 2D та 3D графіки, а також відтворювати динаміку гідрогеологічних процесів, що полегшує аналіз та зрозуміння модельних результатів.

Недоліки:

– висока вартість ліцензії, що може зробити її недоступною для окремих користувачів або менших організацій, які не можуть дозволити собі придбати ліцензію;

– для моделювання складних гідрогеологічних систем або великих регіонів можуть знадобитись значні обчислювальні ресурси та великий об'єм пам'яті;

– обмежена підтримка безкоштовної версії, що може ускладнити використання для деяких користувачів;

– навчання та оволодіння всіма можливостями GMS можуть зайняти багато часу та зусиль, особливо для новачків у гідрогеологічному моделюванні.

Результати аналізу переваг і недоліків розглянутих програмних комплексів для вирішення геофільтраційних задач наведено в табл. 1.4.

З табл. 1.4 видно, що все програмне забезпечення має актуальні версії і продовжує підтримуватися розробниками.

За типом дистрибуції можна виділити MODFLOW, який розповсюджується за MIT ліцензією, на відміну від пропрієтарних конкурентів.

Якщо звертати увагу на задачі, які вирішує ПЗ, то у всіх трьох вони переважно схожі.

Растрові формати, які підтримуються, – однакові. Водночас, у випадку з векторними, – ці формати схожі у FEFLOW та GMS. А MODFLOW, на жаль, не має цієї підтримки.

MODFLOW та FEFLOW мають підтримку самописних модулів для рішення специфічних задач, на відміну від GMS, де вона відсутня.

Таблиця 1.4 – Переваги та недоліки програмного забезпечення
для рішення геофільтраційних задач

Показник	MODFLOW	FEFLOW	GMS
Остання актуальна версія	v. 6.4.2 від 28.06.2023 р.	V 8.0.2 від 2023 р.	10.6.7 від 25.10.2022 р.
Ліцензія	MIT license	пропрієтарна	пропрієтарна
Основне використання	Гідрогеологічне моделювання, керування водними ресурсами, екологічні дослідження, інженерні дослідження, моделювання забруднень	Моделювання потоку та транспорту води, моделювання гідрогеологічних процесів, гідрогеохімічне моделювання, керування водними ресурсами	Моделювання потоку підземних вод, транспорт забруднень, гідрогеологічний аналіз, керування водними ресурсами
Підтримка растрових форматів	ASCII Grid, Binary Grid, GeoTIFF, NetCDF, HDF	ASCII Grid, Binary Grid, GeoTIFF, NetCDF, HDF	ASCII Grid, Binary Grid, GeoTIFF, NetCDF, HDF
Підтримка векторних форматів	Не підтримується	.SHP та .DXF	.SHP, .DXF та .KML
Наявність самописних модулів	Так. На C++ та Fortran	Так. На Python	Ні
Наявність детально описаної документації	Англійською мовою	Англійською мовою	Англійською мовою

Все розглянуте ПЗ для рішення геофільтраційних задач підтримується документацією та офіційним відеоматеріалом англійською мовою.

Таким чином, проаналізувавши програмне забезпечення для рішення геофільтраційних задач за доступністю, кількістю задач, що розв'язуються, підтримкою та практичним матеріалом, було обрано MODFLOW.

1.2.2 Обґрунтування застосування програмного забезпечення для вирішення маркшейдерських задач

При виборі програмного забезпечення для вирішення маркшейдерських задач були використані ті ж критерії, як і для геофільтраційних (п.р. 1.2.1).

1. GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) – є модульною геоінформаційною системою, яка надає доступ до більш ніж 300 модулів при роботі з дво- і тривимірними растровими і векторними даними. За функціональними можливостями вона схожа з продуктом ArcGIS Info [59].

Розробка GRASS почалася 1982 року військовими США (U. S. Army Corps of Engineers' Construction Engineering Research Laboratory, CERL) як закритий проект і повинна була стати альтернативою для комерційних продуктів лінійки ArcGIS. На даний час GRASS має велику кількість користувачів і незалежних розробників і часто зустрічається в академічному середовищі [60] – [61].

Можливості GRASS:

- **Растровий аналіз.** Автоматичне перетворення растрових ліній і областей у векторні, перетворення у векторний і точковий формат даних, кореляційний/коваріаційний аналіз, експертний системний аналіз, алгебра карт (калькулятор карт), інтерполяція за відсутніми значеннями, аналіз матриці сусідства, статистичний аналіз клітин, генерація поверхні з векторних ліній.
- **3D-растровий (воксельний) аналіз.** Імпорт та експорт 3D-даних, 3D-маски, тривимірна алгебра карт, тривимірна інтерполяція (IDW, регуляризовані сплайни з розтягненням), тривимірна візуалізація (ізоповерхні) та інструменти візуалізації POVray.
- **Векторний аналіз.** Формування контурів з растрових поверхонь (IDW, алгоритм сплайнів), перетворення в растровий і точковий формат даних, рекласифікація векторних міток, суперпозиціонування векторних шарів.

- **Аналіз точкових даних.** Тріангуляція Делоне, інтерполяція, багатокутники Тіссена, топографічний аналіз (кривизна, нахил).
- **SQL- підтримка.** Інтерфейси бази даних (DBF, SQLite, PostgreSQL, MySQL, ODBC).
- **Часова структура.** Підтримка аналізу часових рядів для керування, обробки та аналізу (великих) просторово-часових екологічних даних. GRASS підтримує запити, розрахунок карт, агрегацію, статистику та заповнення прогалін для растрових, векторних і растрових даних, моделювання ерозії, аналіз ландшафтної структури, проведення вододілів та вирішення транспортних задач.

Переваги: модульність, відкритість вихідного коду.

Недоліки: недружний інтерфейс, топологічні конфлікти між межами можуть призвести до помилок в розрахунках і аналізі даних.

2. gvSIG (*Generalitat Valenciana, Sistema d'Informació Geogràfica*) – один з найбільших проектів, розробка якого здійснювалась для заміни ESRI ArcView в органах муніципальної влади Іспанії, gvSIG підтримує роботу з растровими і векторними даними, а також здатний працювати з геоданими, що зберігаються в різних базах даних (БД). Функції по роботі з растровими даними побудовано на основі алгоритмів проекту SAGA. Мова програмування – Java [62].

Можливості gvSIG:

- робота з шарами, завдяки якій можливо відображати лише необхідні в даний момент об'єкти;
- функції масштабування карти;
- підтримка збереження необхідних ракурсів карти;
- автоматичні розрахунки відстані між об'єктами і площами областей;
- розміщення активних об'єктів на карту;
- створення професійних географічних карт з необхідними елементами, які можна згодом друкувати.

Переваги: підтримка великої кількості векторних і растрових форматів, поширюється з відкритим вихідним кодом за ліцензією GPL, інтерфейс успадковує принцип організації в ArcGIS view.

Недоліки: відсутність документації для розробників і залежність від більш ніж 100 C++ і Java бібліотек, необхідність встановлювати готові проекти в певну папку на диск, недостатня підтримка користувачів.

3. qGIS (*Quantum GIS*) – метою розробки даної програми було створення більш легкого і зрозумілого інтерфейсу, ніж у аналогічних продуктів. Досягши цього, проект широко розвинув свою функціональність за допомогою модулів розширення на C++ або Python. QGIS має одне з найбільш розвинених співтовариств у середовищі відкритих ГІС, при цьому кількість розробників постійно збільшується, чому сприяє наявність хорошої документації по процесу розробки і зручна архітектура [63] – [65].

Можливості qGIS:

- **перегляд даних.** Можна переглядати і накладати між собою векторні та растрові дані в різних форматах і проекціях без перетворення у внутрішній або загальний формат. Підтримуються такі основні формати:
- **дослідження даних і компоування карт.** За допомогою зручного графічного інтерфейсу можна створювати карти і досліджувати просторові дані. Графічний інтерфейс містить у собі велику кількість корисних інструментів:
 - перепроеціювання «на льоту»;
 - компоування карт;
 - панель огляду;
 - просторові закладки;
 - визначення / вибірка об'єктів;
 - редагування / перегляд / пошук атрибутів;
 - підписання об'єктів;
 - зміна символіки векторних і растрових шарів;

- додавання шару координатної сітки засобами розширення fTools;
 - додавання до макету карти стрілки на північ, лінійки масштабу і знака авторського права;
 - збереження і завантаження проектів.
- **Аналіз даних.** Дозволяє аналізувати векторні просторові дані в PostgreSQL/PostGIS та інших форматах, підтримуваних OGR, використовуючи модуль Processing, написаний на мові програмування Python. В даний час QGIS надає можливість використовувати інструменти аналізу, вибірки, геопроектингу, керування геометрією і базами даних. Також можна використовувати інтегровані інструменти GRASS, які містять у собі функціональність більш ніж 300 модулів GRASS.

Переваги: легкий і зрозумілий інтерфейс, одне з найбільших ком'юніті, об'ємна документація, можливість написання модулів на C ++ або Python; програма вільно розповсюджується за ліцензією GPL.

Недоліки: в деяких випадках комерційні ГІС мають більше інструментарію, модулів і можливостей.

4. ArcGIS – сім'я геоінформаційних програмних продуктів американської компанії ESRI. Застосовується для земельних кадастрів, в задачах землеустрою, обліку об'єктів нерухомості, систем інженерних комунікацій, геодезії та надрокористування й інших областях. Є однією з найбільш використовуваних комерційних ГІС-систем у світі з унікальним набором інструментів. Деякі з них не мають аналогів в інших ГІС-системах [59], [66].

Можливості:

- **Створення карт.** Використання попередньо встановлених шаблонів карт дозволяє заощадити час і спростити процес створення однакових карт.
- **Просторові запити.** Інтерактивне вимірювання відстаней та площ, пошук об'єкта на карті, вибір даних за розташуванням або за атрибутами, зняття вибірки з об'єктів, переключення вибірки, доступ до

властивостей шару через діалогове вікно, ідентифікація і багато іншого.

- **Базові можливості моделювання і аналізу.** Моделювання просторових співвідношень дозволяє оцінити глибину зв'язків між різними об'єктами і вивести результати аналізу у вигляді звітів або діаграм.
- **Просте редагування об'єктів і інтеграція даних.** Створення і редагування точкових, лінійних і полігональних об'єктів. Значна кількість зручних інструментів по роботі з геометрією просторових об'єктів, введення і редагування їх атрибутивних значень.
- **Аналіз даних.** Можна використовувати різні типи даних, включаючи дані демографічних досліджень, статистичних служб, креслення САПР, знімки, веб-сервіси та мультимедії.

Переваги: унікальний набір інструментів і модулів, хороша клієнтська підтримка, значний об'єм документації.

Недоліки: велика вартість ліцензії.

5. ILWIS GIS – геоінформаційна система, яка поєднує функціональність векторної і растрової ГІС, призначеної для вирішення широкого діапазону задач – від аналізу зображень до моделювання ерозійних процесів [67], [68].

Функціональних можливостей ПЗ ILWIS досить, щоб повноцінно працювати з векторними даними і виробляти оформлення карт для виведення. Програмний пакет підтримує імпорт найбільш поширених векторних і растрових форматів, підключення БД і WMS-сервісів. Ця програма підтримує роботу бібліотеки GDAL, що дозволяє працювати з більш широким списком форматів даних.

Можливості:

- геометрична корекція;
- підвищення візуальної якості зображень;
- вилучення інформації;
- багатозональна класифікація;

- редагування і доповнення результатів обробки знімків картографічними елементами.

Переваги: відкритий вихідний код, наявність інструментарію для аналізу ерозійних процесів.

Недоліки: версія програми потребує оновлення.

6. uDIG (*User-friendly Desktop Internet GIS*) – основною метою розробки даної програми був перегляд і редагування даних, що зберігаються в БД. Дуже часто uDig використовується як інтерфейс доступу до бази даних PostGIS [69].

Переваги: відкрите програмне забезпечення.

Недоліки: обмеження по роботі з векторними і растровими форматами даних, проблеми з продуктивністю, техпідтримкою і навчанням.

7. САМАРА (CAD/GIS) – система близька до систем АМ / FM. Основне її призначення – автоматизація основних операцій камеральної обробки інформації маркшейдерським (геолого-маркшейдерським) підрозділом гірничодобувного підприємства. Платформою для системи САМАРА є програмне забезпечення AutoCAD [70].

САМАРА застосовується для розробки інформаційно-геометричної моделі гірничого відводу підприємства, поточного її поповнення і використання для вирішення задач камеральної обробки даних: проектних, розрахункових, графічних. Вбудований інструментарій системи містить модулі, що дозволяють проводити обробку і документування даних польових вимірювань, а на основі отриманих результатів поповнювати графічну частину моделі, готувати графічну документацію різного призначення і масштабів, виконувати проектні розрахунки і промальовування. Геологічна підсистема дозволяє на основі різномірних даних розробляти, редагувати й аналізувати моделі геологічних пластів і денної поверхні.

Переваги:

- прийнятний рівень ймовірності помилок;
- оперативна підготовка звітної документації;
- отримання суміщених з різних горизонтів планів гірничих робіт;

- можливість подання гірничої виробки в тривимірному просторі, проведення необхідних вимірювань і багато іншого;

- той факт, що САМАРА є додатком до ПЗ AutoCAD, забезпечує інтеграцію реалізованої нею технології з відомими CAD і ГІС технологіями. Серед більш ніж 4000 офіційно зареєстрованих додатків до AutoCAD існують системи, що розширюють технологію САМАРИ. Ця обставина забезпечує можливість обміну графічними даними з іншими графічними (і не графічними) системами.

Недоліком є те, що внаслідок постійної зміни даних потрібно проводити регулярне оновлення моделі. У зв'язку з тим, що внесення змін до бази даних процес досить складний, то забезпечення достовірності моделювання є важким завданням. Наступним недоліком є те, що в зв'язку з багатокомпонентністю процесу видобутку корисних копалин цифрова модель шахти повинна містити в собі значну кількість взаємозалежної інформації. Тому для зберігання, обробки і регулярного резервування з виключенням можливості втрати інформації такій моделі потрібен великий об'єм зовнішньої та оперативної пам'яті.

Результати аналізу розглянутих програмних продуктів наведено в табл. 1.5. Як видно з табл. 1.5, найбільш актуальні версії є майже у всіх програм, за винятком ILWIS GIS і Udig. За областю застосування краще представлена ГІС САМАРА, яка вирішує широкий спектр маркшейдерських геоінформаційних задач і є українською розробкою.

ArcGIS теж вирішує великий об'єм задач маркшейдерії та моделювання, підтримує велику кількість растрових і векторних форматів, але в порівнянні з САМАРОЮ комерційна ліцензія даного ПЗ значно вище, що ускладнює її використання.

Якщо порівняти ГІС-системи, поширювані за GNU/GPL ліцензією, то за якістю та об'ємом вирішення задач можна виділити GRASS, gvSIG і qGIS.

Таблиця 1.5 – Характеристика програмного забезпечення

Показник	GRASS	gvSIG	qGIS	ArcGIS	ILWIS GIS	uDIG	SAMARA
1	2	3	4	5	6	7	8
Остання актуальна версія	7.8 від 15.09.19	2.4 від 21.02.18	2.18.3 від 18.08.17	10.5.1 від 27.06.17	3.08.05 від 03.09.15	2.0.0 від 14.10.15	2018 рік
Ліцензія	GPL	GNU GPL	GNU GPL	Пропрієтарна	GPL	EPL + BSD	Пропрієтарна
Основне використання	Керування просторовими і растровими, векторними даними, обробка супутникових знімків, створення карт, просторове моделювання і візуалізація	Створення професійних географічних карт з необхідними елементами	Перегляд, керування, аналіз і дослідження векторних і растрових даних, створення карт, просторове моделювання і візуалізація	Складання земельних кадастрів в задачах землеустрою, обліку об'єктів нерухомості, систем інженерних комунікацій, геодезії та надкористування і в інших областях	Аналіз зображень, векторних та растрових даних, моделювання ерозійних процесів	Аналіз векторних і растрових даних	Обробка даних польових вимірювань з графічним відображенням і документуванням результатів, моделювання та аналіз геометрії гірничих виробок, створення інформаційно-пошукової бази даних об'єктів моделі, обробка геологічної інформації

Продовження табл. 1.5

1	2	3	4	5	6	7	8
Підтримка растрових форматів	Jpeg, GeoTIFF, ESW, Arc/ Info grid	BMP, GIF, TIFF, JPEG, JP2, PNG, VRT, DAT of ENVI, ERDAS	Підтримується більшість існуючих форматів	Підтримується більшість існуючих форматів	Jpeg, GeoTIFF, ESW, Arc/ Info grid	Jpeg, GeoTIFF	Підтримується більшістю існуючих форматів
Підтримка векторних форматів	SHP, GML, DXF	SHP, GML, KML, GPX	SHP, GML, KML, GPX	Підтримується більшість існуючих форматів	SHP, DXF	SHP, GML	Підтримується більшістю існуючих форматів
Наявність самописних модулів	Підтримується розробка модулів на C / C ++ і Python	Підтримується розробка на Java	Підтримується розробка модулів на C / C ++ і Python	Додаткові модулі розробляються тільки за допомогою вбудованого SDK	Розробка модулів відсутня	Підтримується розробка на Java	Інтеграція з програмним забезпеченням Autodesk Autocad і розробка на C / C ++
Наявність детально описаної документації	Англійською мовою	Англійською та іспанською мовами	Українською мовою	Англійською мовою	Англійською мовою	Англійською мовою	Українською мовою

Одним з важливих аспектів геоінформаційної системи є можливість створення програмних модулів для додавання функціоналу в ГІС-систему. Дану можливість точно підтримують всі ГІС-системи, крім ILWIS GIS. Для ArcGIS і GRASS модулі розробляються на мові Python і C / C ++, для gvSIG і uDIG – на мові Java, а для qGIS і САМАРА – тільки на C ++.

Всі ГІС-системи мають достатньо високий рівень документації, переважно представленої англійською мовою. З цього переліку можна виділити такі ГІС-системи як САМАРА і qGIS – з документацією українською мовою. Таким чином, порівнявши всі показники пропрієтарних і вільних ГІС-систем було зроблено висновок щодо можливості її використання для рішення маркшейдерської задачі дисертаційної роботи. Однак для вирішення поставленого в дисертаційній роботі завдання вона вимагає використання додаткового ПЗ для побудови мульди зсуву підробленої гірничими роботами земної поверхні, а також в ній використовується багато ручних операцій, наприклад, для збору та обробки вихідних даних.

Тому для автоматизації процесів керування гідроекологічними ризиками виникає необхідність в розробці власного програмного забезпечення менеджера гідроекологічних ризиків (МГЕР), яке дозволить оптимізувати процеси керування, відмовитись від використання стороннього ПЗ (наприклад САМАРА) і значно зменшить час на виконання задач з моделювання та обчислення площі затоплення земної поверхні.

1.3 Структурно-логічна схема виконання дослідження

Як вже було зазначено у вступній частині, мета даної роботи полягає в обґрунтуванні гідрогеономеханічних параметрів, що обумовлюють фізичне формування гідроризиків при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт на основі створення і впровадження послідовності чисельних комп'ютерних моделей і програмного забезпечення як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою шахтних полів у Західному Донбасі.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

1) Виконати аналітичний огляд можливостей керування гідроекобезпекою в межах шахтних полів.

2) Обґрунтувати та реалізувати методику модельного відображення гідродинамічних та геомеханічних процесів у масиві шахтного поля для автоматизації керування синхронізацією гірничих робіт та їх згортанням із мінімізацією негативних гідродинамічних явищ.

3) Виконати аналітичне обґрунтування методики моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами та розробку оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля щодо визначення зон і об'ємів затоплення поверхні землі для прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті шахт Західного Донбасу.

4) Виконати моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами і встановити закономірності зміни площі та об'ємів затоплення поверхні землі для прогнозування гідроекологічних ризиків при закритті шахт Західного Донбасу.

5) Виконати реалізацію використання послідовності обґрунтованих моделей як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою вуглевидобутку і згортання гірничих робіт.

6) Виконати оцінку економічної ефективності використання оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля.

Розгорнута структурно-логічна схема виконання досліджень наведена на рис. 1.2.

Аналітичні дослідження на першому етапі містять у собі аналіз інформаційних систем та програмного забезпечення, призначених для вирішення завдань керування гідрогіодинамічними та геомеханічними процесами при веденні гірничих робіт.

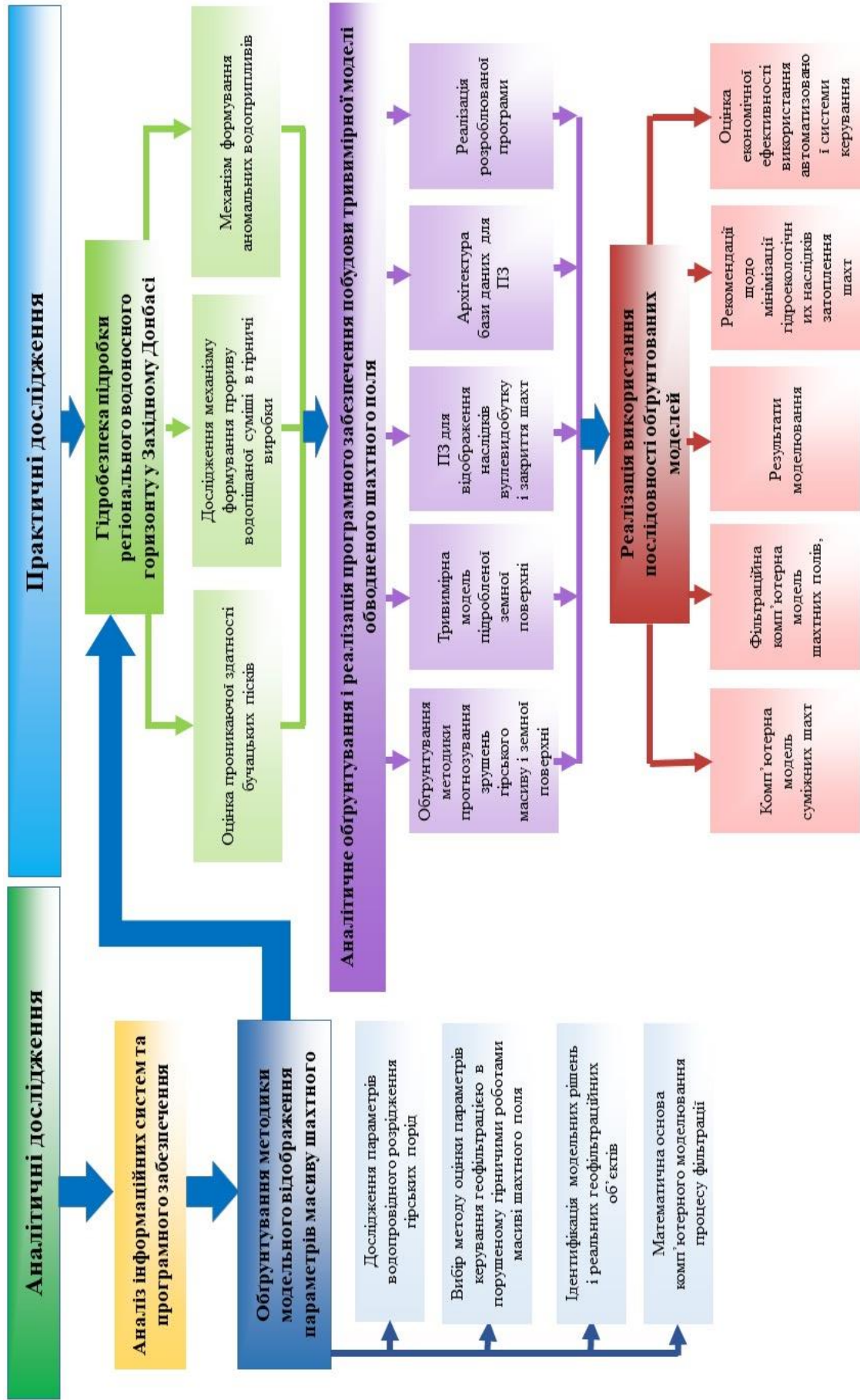


Рисунок 1.2 – Структурно-логічна схема проведення досліджень

На другому етапі необхідно виконати обґрунтування методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля для автоматизації процесів керування синхронізацією гірничих робіт та їх згортанням із мінімізацією негативних гідродинамічних явищ: емпірично-аналітичне дослідження параметрів водопровідного розрідження гірських порід під час розробки вугільних пластів; аналітичний вибір методу оцінки параметрів керування геофільтрацією в порушеному гірничими роботами масиві шахтного поля з ідентифікацію модельних рішень і реальних геофільтраційних об'єктів методом електрогідродинамічних аналогій за даними натурних вимірювань і моделювання на еквівалентних матеріалах; обґрунтувати математичну основу комп'ютерного моделювання процесу фільтрації підземних вод під час експлуатації та затоплення шахт.

На заключному етапі аналітичних досліджень планується аналітичне обґрунтування програмного забезпечення побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля.

Прикладні дослідження містять у собі дослідження з гідробезпеки підробки регіонального водоносного горизонту в Західному Донбасі. Для цього необхідно виконати: оцінку проникаючої здатності бучацьких пісків; дослідження механізму формування прориву водопіщаної суміші в гірничі виробки з моделюванням напружено-деформованого стану попередньо розшарованої водозахисної товщі, експериментальні дослідження захисних властивостей гірських порід та використання розрахункового методу визначення розкриття тріщин розшарування в експериментальних свердловинах над гірничими виробками. На заключному етапі цих досліджень необхідно визначити механізм формування аномальних водоприпливів.

За результатами цих досліджень планується виконати обґрунтування методики прогнозування зрушень гірського масиву і земної поверхні у Західному Донбасі з використанням комп'ютерного моделювання, розробити тривимірну модель підробленої земної поверхні та програмне забезпечення для відображення наслідків вуглевидобутку і закриття шахт Західного

Донбасу, що формують гідроризики на шахтному полі. Для цього необхідно створити архітектуру бази даних для програмного забезпечення та реалізувати розроблену програму у ролі дослідницької апробації з розробкою інтерфейсів ПЗ для менеджера свердловин і побудови моделі з визначенням динаміки зміни площ та об'єму затоплення при поступовому відпрацюванні вугільних пластів.

На заключному етапі прикладних досліджень необхідно зробити реалізацію використання послідовності обґрунтованих моделей як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою вуглевидобутку і згортання гірничих робіт. Для цього необхідно створити: фільтраційну комп'ютерну модель шахтних полів; комп'ютерну модель суміжних шахт, що готуються до закриття в режимі синхронізації гірничих робіт та їх згортання; проаналізувати результати комп'ютерного моделювання для різних варіантів синхронізації гірничих робіт і закриття суміжних шахт та розробити рекомендації щодо мінімізації гідроекологічних наслідків затоплення шахт у режимі синхронізації з гірничими роботами.

На базі отриманих результатів аналітичних та прикладних досліджень планується виконати оцінку економічної ефективності використання автоматизованої системи керування гідроекобезпекою в межах шахтних полів.

Висновки за розділом

1. За результатами аналітичного огляду встановлено, що основними чинниками, які впливають на гідроекобезпеку шахтних полів при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт є: 1 – геомеханічні, 2 – гідрогеодинамічні. До перших відносяться такі основні процеси як порушення, зсув та просідання масиву гірських порід – видозмінені від початкового стану шахтного поля. До других – процес геофільтрації техногенного середовища шахтних полів.

2. Встановлено, що Дніпропетровська область, на території якої розташовані запаси вугілля Західного Донбасу, займає третє місце за більшістю

показників щодо осідання підробленої земної поверхні після Донецької та Луганської областей, а за загальною площею підтоплення в межах осідання – друге (46,56 км²), або понад 9 % від загальної площі всього родовища, і це в той час, коли активний процес закриття шахт тільки розпочався. Максимальна глибина осідання земної поверхні становить 5 м.

3. Виконано аналіз інформаційних систем та програмного забезпечення, призначених для вирішення завдань керування гідрогеодинамічними та геомеханічними процесами при веденні гірничих робіт. За результатами аналізу для рішення геофільтраційних задач за доступністю, кількістю задач, що вирішуються, підтримкою та практичним матеріалом було обрано ПЗ MODFLOW. Для розв'язання геомеханічних та маркшейдерських задач було зроблено висновок щодо можливого використання ПЗ САМАРА. Однак, для вирішення поставленого в дисертаційній роботі завдання вона вимагає використання додаткового ПЗ для побудови мульди зсуву підробленої гірничими роботами земної поверхні, а також в ній використовується багато ручних операцій, наприклад, для збору та обробки вихідних даних.

4. Для автоматизації процесів керування гідроекологічними ризиками виникає необхідність в розробці власного програмного забезпечення, менеджера гідроекологічних ризиків (МГЕР), яке дозволить оптимізувати процеси керування, відмовитись від використання стороннього ПЗ (наприклад САМАРА) і значно зменшить час на виконання задач з моделювання та обчислення площі затоплення земної поверхні.

5. Основні результати першого розділу опубліковано в наукових працях [2], [40].

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛЬНОГО ВІДОБРАЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МАСИВУ ШАХТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ ГІРНИЧИХ РОБІТ ТА ЇХ ЗГОРТАННЯМ ІЗ МІНІМІЗАЦІЄЮ НЕГАТИВНИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ

2.1 Емпірично-аналітичне дослідження параметрів водопровідного розрідження гірських порід під час розробки вугільних пластів

Найсуттєвіші зміни породного масиву шахтного поля відбуваються внаслідок інтенсивної геомеханічної дії гірничих робіт різного геотехнічного призначення. Загальноприйнятим є поняття «геомеханічний стан» масиву гірських порід, який у відповідних параметрах характеризує його у просторі та часі. Вугленосні товщі, як правило, містять водоносні пласти, що є важливим фактором, який ускладнює геомеханічний стан породного масиву, технологію гірничих робіт та їх гідроекобезпеку, включно зі стадією закриття шахт. У зв'язку з цим було обґрунтовано, детально параметризовано і підтверджено успішною гірничою практикою поняття «геофільтраційний стан гірського масиву» навколо гірничих виробок [71].

Так, на підставі розрахункової схеми наведено аналітичне рішення про розвиток водопровідних тріщин у породній півсфері над очисною виробкою, в якій межа проникності водотривких порід, що деформуються, пов'язана з межею пружної та пластичної областей, причому в останній істотно проявляється розрідження. Зсуви контуру покрівлі очисної виробки введено в розрахункову схему консервативним параметром, що відображає усереднені дані експериментальних вимірів конвергенції покрівлі. У цій ситуації зникають із розгляду технологічні елементи керування станом покрівлі, зокрема й її проникністю. Цю обставину важливо врахувати, маючи на увазі дві тези:

1 – зсув покрівлі в очисній виробці зумовлюється значною за розмірами ділянкою покрівлі, де позначається вплив технологічних параметрів кріплення і чинник часу; 2 – вдале поєднання аналітичного рішення й емпіричних залежностей, що описують зсув покрівлі, вносить елемент навчання ідеалізованої аналітичної моделі через досягнення збіжності розрахунків добре контрольованим параметром на межах.

Розглянемо варіант модифікації наведеного рішення, а також проаналізуємо чисельні результати розрахунків для гірничо-геологічних умов шахт Західного Донбасу, де проблема дослідження водопровідного тріщиноутворення навколо гірничих виробок має важливе практичне значення.

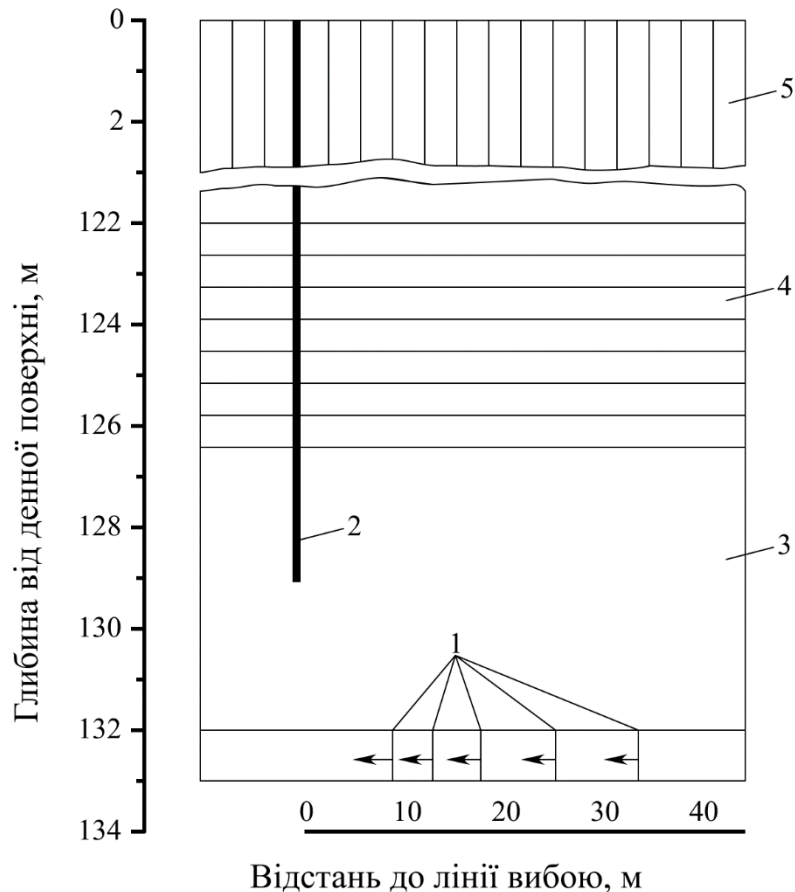
Динаміка реологічних явищ у масиві, що підробляється, з метою встановлення кількісного зв'язку, що характеризує вплив очисного виймання на показники тимчасової деформованості гірських порід у вертикальному розрізі, вивчалася із залученням результатів геофізичних вимірів в експериментальних свердловинах, пробурених до початку очисних робіт на полях шахт «Тернівська» і «Благодатна» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля». Буріння, обладнання та стандартний комплекс геофізичних вимірювань у свердловинах виконано Павлоградською геологорозвідувальною експедицією.

Загалом на полі зазначених шахт було пробурено три свердловини глибиною 109,8 – 127,5 м. Від поверхні до кам'яновугільних відкладень свердловини обсаджували трубами, а основу обладнали цементним ущільнювачем. Вуглевмісна товща гірських порід розбурена діаметром 112 мм.

Відстань вибою свердловини до покрівлі пластів, що відпрацьовуються, становила 4,0 – 27,7 м.

Підробка свердловин проводилася 616 лавою шахти «Тернівська» і 803 лавою шахти «Благодатна». До комплексу вимірювань, розпочатих заздалегідь до підходу лав, які проводилися періодично, увійшли: уявний електричний опір, потенціал природної поляризації, природна радіоактивність, розсіяне гамма-випромінювання, діаметр свердловин.

Геофізичні вимірювання у свердловинах виконано за різних положень лінії очисного вибою. Усі види каротажних діаграм стійко реагували на збурювальну дію очисного виймання в породному масиві (рис. 2.1). Це дало змогу виявити деякі особливості зміни геофізичних параметрів порід, спричинених деформацією свердловин на різних стадіях підробки та в зоні опорного тиску.



- 1 – положення очисного вибою на різні моменти вимірювань;
 2 – свердловина; 3 – аргіліт; 4 – алевроліт; 5 – покривні відкладення

Рисунок 2.1 – Схема експериментальних геофізичних вимірювань (шахта «Благодатна»)

Показовими є дані кавернометрії – вимірювань діаметра свердловин. Кавернограми відображають зміни діаметра свердловин за глибиною, а їх зіставлення для різних положень очисного вибою дає змогу судити про величину геомеханічної дії у породному масиві.

Під час опрацювання кавернограм встановлено, що горизонтальні відносні деформації свердловин добре описуються кореляційною залежністю:

$$\varepsilon_c = a_K \cdot h_r + b_K, \quad (2.1)$$

де ε_c – горизонтальна відносна деформація стовбура свердловини;

h_r – глибина до точки вимірювання, м;

a_K – коефіцієнт із розмірністю, м^{-1} ;

b_K – безрозмірна постійна, що чисельно дорівнює деформації ε_c на контакті кам'яновугільних вуглевмісних порід і молодших пост-карбонівих відкладень.

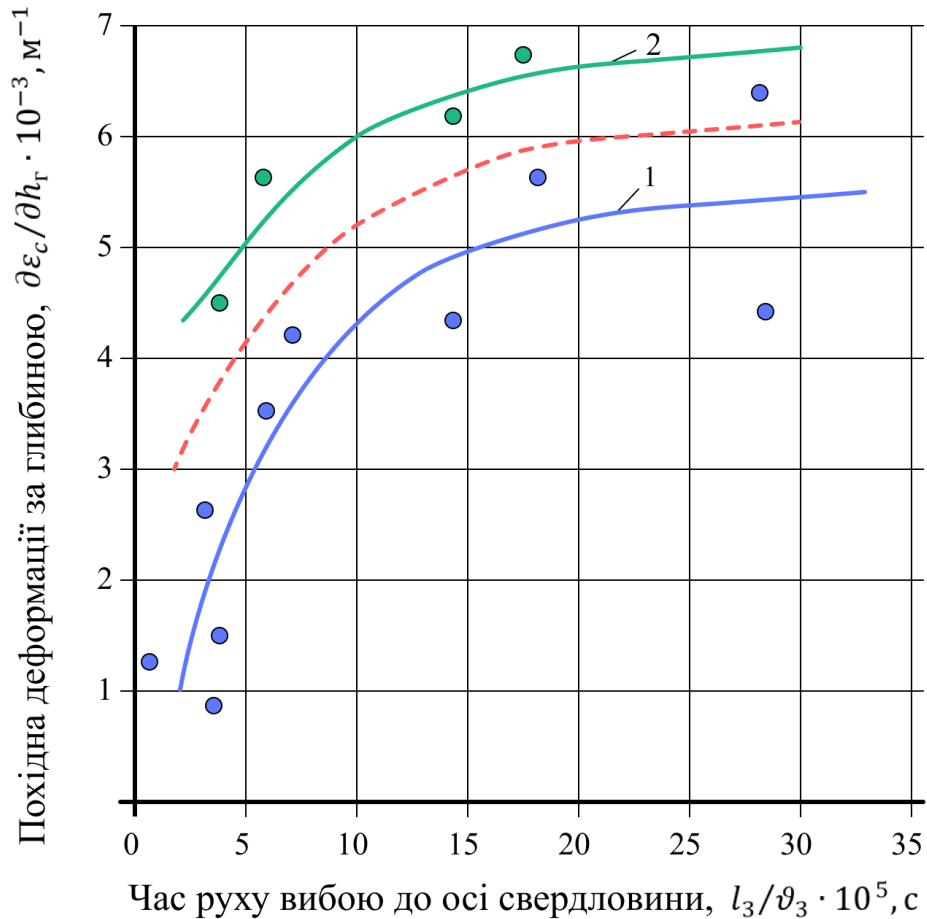
В інтервалі 30-метрової породної покрівлі вугільних пластів, що відпрацьовуються, тіснота лінійного зв'язку характеризується коефіцієнтами кореляції 0,7 – 0,9.

Під час опрацювання результатів вимірювань породні шари, представлені аргілітами й алевролітами, виділено окремо, оскільки ступінь їх деформування різний.

На рис. 2.2 наведено графік експериментальної залежності деформації по вертикалі:

$$\frac{d\varepsilon_c}{dh_r} = f\left(\frac{l_3}{\vartheta_3}\right), \quad (2.2)$$

де на ординатній осі нанесено значення похідних деформацій за висотою свердловини, які чисельно дорівнюють абсолютним значенням коефіцієнта a_K , отриманих кореляційних залежностей (2.1). По осі ординат відкладено значення відношення горизонтальних відстаней l_3 від лінії очисного вибою до осі експериментальних свердловин на момент проведення кавернометрії до швидкості пересування ϑ_3 очисного вибою на ділянці між попереднім і проведеним вимірами.



1 – для аргілітів; 2 – для алевролітів

Рисунок 2.2 – Експериментальна залежність часового параметра деформування гірських порід від відстані до вибою та швидкості його посування

Можна припустити, що в породному масиві, збурюваному різними стадіями підробки очисною виробкою, реологічні властивості порід згладжують динамічну дію, тому має існувати, незалежно від виду прикладеного навантаження, вираз:

$$\frac{\partial \varepsilon_c}{\partial h_r} = f\left(\frac{\partial \sigma}{\partial h_r}\right), \quad (2.3)$$

де σ – деякі напруження, що діють у породному масиві.

Передбачається також, що конкретний вид зв'язку (2.3) має відображатися комплексними часовими параметрами, які свідчать про певний рівно-

важний стан між пружними та реологічними змінами в підроблюваному масиві.

Відношення l_3/ϑ_3 має розмірність часу, тому усереднювальні криві 1 і 2 на рис. 2.2 можна описати успадкованим рівнянням з різницеvim ядром Абеля, що із введенням похідної деформації за глибиною набуде вигляду:

$$\frac{\partial \mathcal{E}_c}{\partial h_r}(t) = \frac{1}{E} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial h_r}(t) + \int_0^t \delta_d (t - \tau)^{-\mathcal{L}_d} \frac{\partial \sigma}{\partial h_r}(t) d\tau \right], \quad (2.4)$$

де E – модуль пружності (лінійної деформації);

t, τ – поточний і одиничний час;

\mathcal{L}_d, δ_d – реологічні параметри породного масиву, що відображаються деформацією діаметра свердловини (індекс d).

За умови, що:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial h_r} = const, \quad (2.5)$$

інтегрування виразу (2.4) дає:

$$\left(\frac{d\mathcal{E}_c}{dh_r} \right)_i = \left(\frac{d\mathcal{E}_c}{dh_r} \right)_0 \left(1 + \frac{\delta_d}{1 - \mathcal{L}_d} t_i^{1-\mathcal{L}_d} \right), \quad (2.6)$$

де похідна деформацій \mathcal{E}_c за глибиною h_r з індексом «0» відповідає відношенню:

$$t_0 = \frac{l_3}{\vartheta_3} = 0. \quad (2.7)$$

При цьому передбачалося, що сталість похідної інтенсивності напружень по вертикалі не суперечить загальноприйнятим уявленням про характер реологічних змін у породному масиві навколо гірничих виробок, де відбувається релаксація і вирівнювання напружень [72].

Експериментальні виміри, які б відповідали положенню очисного вибою безпосередньо під свердловиною, не виконувались, точніше таке співпадіння

важко досягне. У зв'язку з цим логарифмічне вирівнювання експериментальних кривих, що значно спрощує знаходження реологічних параметрів, неможливе. Тому для обчислення зазначених параметрів за трьома довільними точками кожної з усереднювальних кривих 1 і 2 (рис. 2.2) отримано систему рівнянь (2.6), за якою розраховано значення параметрів \mathcal{L}_d і δ_d , які для аргілітів дорівнюють відповідно $0,99 c^{1-\mathcal{L}_d}$ та $0,009 c^{1-\mathcal{L}_d}$, а для алевролітів – $0,98 c^{1-\mathcal{L}_d}$ і $0,02 c^{1-\mathcal{L}_d}$. Величини параметрів і фізично і чисельно нерівнозначні параметрам повзучості гірських порід, наданими в роботі [72]. В умовах, що розглядаються, їх можна іменувати параметрами пружно-реологічної податливості породного масиву, на який впливає очисна виробка.

Показовість отриманих чисельних значень параметрів для аргілітів і алевролітів характеризується тим, що кожна з експериментальних точок (рис. 2.2) отримана за результатами 14 – 17 вимірів у подібних за літологією породних шарах. Причому, аргіліто-алевролітові різновиди вуглевмісної товщі на полі шахти «Благодатна» істотно відрізняються від аналогічних у шахті «Тернівська», що вплинуло на параметри лінеаризації в рівняннях регресії та сприяло їх узагальнювальному вирівнюванню.

Необхідно відзначити одну важливу обставину щодо практичного використання експериментальних параметрів. Час у формулах реологічної податливості (аналог повзучості) (2.4), (2.6) слід розуміти не у звичайному фізичному розумінні, а як часовий вимір відстані до очисного вибою, що рухається з певною швидкістю (див. формулу (2.2)).

Деформації гірських порід між покрівлею очисної виробки і підшвою водоносного горизонту, представленого дрібнозернистим піском, можна описати співвідношенням:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\theta Lt} &= \varepsilon_{\theta L} + v_c(\beta_3 + 1) \left(\frac{1}{R_{Lt}} - \frac{1}{R_L} \right) Z \\ Z &= \left[1 + \frac{\delta_d}{1 - \mathcal{L}_d} \left(\frac{x_{\Lambda}}{\vartheta_3} \right)^{1 - \mathcal{L}_d} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (2.8)$$

де (крім відомих параметрів \mathcal{L}_d та S_d) $\varepsilon_{\theta L}$ та $\varepsilon_{\theta L_t}$ – умовно миттєві та такі, що відповідають певній швидкості посування очисного вибою ϑ_3 , тангенціальні деформації на межі водопровідних тріщин із непроникним масивом гірських порід;

R_{L_t} и R_L – радіуси цих же меж породної півсфери, в якій реалізується її рівновага над очисним вибоєм, м;

x_A – ширина підтримуваного кріпленням привибиїного простору, м;

β_3 – коефіцієнт пропорційності між тангенціальними і радіальними деформаціями гірських порід;

u_c – середні зміщення покрівлі по ширині привибиїного простору.

Якщо враховувати, що значною мірою $u_c = f(\vartheta_3)$, то необхідно прийняти зв'язок:

$$\varepsilon_{\theta L} = \varphi(R_0); \quad \varepsilon_{\theta L_t} = \varphi(R_{L_t}), \quad (2.9)$$

де R_0 – радіус розрахункової області рівноважного стану породної півсфери, яка описує поверхню середніх умовно миттєвих зміщень покрівлі u_0 у привибиїному просторі, щодо якого ведеться розрахунок умовно миттєвих деформацій.

З розв'язання рівнянь спільності деформацій і з урахуванням прийнятих зв'язків (2.9), маємо:

$$\varepsilon_{\theta L} = \frac{u_0 R_0^{\beta_3}}{R_L^{\beta_3+1}}; \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_{\theta L_t} = \frac{u_c R^{\beta_3}}{R_{L_t}^{\beta_3+1}}. \quad (2.11)$$

Компоненти напружень на межі з водоносним дрібнозернистим піском врівноважуються гідростатичним полем напружень, що дорівнює вазі верхньої товщі.

З урахуванням рівняння рівноваги породної півсфери над очисним вибоєм з позамежними деформаціями за критерієм міцності Кулона-Мора, відображується співвідношенням:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta L} + \frac{\sigma_{\theta L}}{2\lambda + 1} &= 4B - \frac{\gamma_{\Pi} R_L}{4(1 + V)} + \frac{\sigma_c}{2\lambda + 1} \\ B &= \frac{\gamma_{\Pi} R_b}{4(1 - V)} - \frac{\gamma_b H_b}{2} \\ \lambda &= \frac{\sin \varphi}{1 - 2 \sin \varphi} \end{aligned} \right\}, \quad (2.12)$$

де $\sigma_{\theta L}$ – напруження на межі водопровідних тріщин (тобто позамежних деформацій) водотривкого масиву без урахування фактору часу;

σ_c – міцність на одноосьове стиснення гірських порід між очисною виробкою і водоносним горизонтом з урахуванням структурного ослаблення масиву;

R_b – відстань між початком координат для R_0 і підшовою водоносного горизонту;

H_b – потужність зони від денної поверхні до підшови водоносного горизонту;

γ_{Π} і γ_b – відповідно щільність гірських порід у покрівлі очисної виробки та у водоносному горизонті;

V і φ – коефіцієнт Пуассона і кут внутрішнього тертя гірських порід у покрівлі очисної виробки.

З виразів (2.12) з урахуванням співвідношень узагальненого закону Гука і формул (2.10) – (2.11) випливає:

$$\left. \begin{aligned} \frac{WU_o R_0^{\beta_3}}{QR_L^{\beta_3+1}} + \frac{\gamma_{\Pi} R_L}{4(1-V)} &= \frac{\sigma_c}{2\lambda+1} + 4B + \frac{WN}{Q} \\ W &= 1 + \frac{1}{2\lambda+1}, \quad Q = \frac{1+V}{E_{\Pi}} \left(1 - \frac{V}{2\lambda+1} - V \right) \\ B &= \frac{\gamma_{\Pi} R_b}{4(1-V)} - \frac{\gamma_b H_b}{2}, \quad N = \frac{(1+V)V\sigma_c}{E_{\Pi}(2\lambda+1)} \end{aligned} \right\}, \quad (2.13)$$

де E_{Π} – модуль деформації гірських порід між водоносним горизонтом і покрівлею очисної виробки.

З використанням виразу (2.8) аналогічні перетворення приводять до формули для визначення R_{Lt}

$$\frac{WU_c}{QR_L^{\beta_3}} \left[\frac{R_L^{\beta_3}}{R_{Lt}} - (\beta_3 + 1)Z \right] = \frac{\sigma_c}{2\lambda+1} + 4B + \frac{WN}{Q} - \frac{\gamma_{\Pi} R_L}{4(1-V)} - \frac{WU_c(\beta_3+1)Z}{QR_L}. \quad (2.14)$$

Різниця значень R_{Lt} і R_L , що розраховуються за трансцендентними формулами (2.12) – (2.13), визначає висоту розвитку водопровідних тріщин над очисною виробкою при відомих зміщеннях покрівлі u_0 та u_c . Чисельний аналіз виразів (2.13) – (2.14) показує стійку залежність $R_L, R_{Lt} = f(u_0, u_c)$.

Найбільшу кількість факторів, що впливають на зміщення покрівлі в очисних виробках, враховано емпіричними залежностями (2.15) – (2.16), отриманими на основі показових даних [73], [74]

$$\Delta l = 0,01(a_{\Lambda} - b_{\Lambda}P_{\Lambda} + C_{\Lambda}e^{-n_{\Lambda}P_{\Lambda}})m_{\Lambda}l_{\Lambda}e^{-\frac{K_{\Lambda}}{t_{\Lambda}}}, \quad (2.15)$$

де Δl_I – опускання покрівлі на межі привибійного простору, см;
 l_{Λ} – ширина привибійного простору, м;
 m_{Λ} – потужність пласта, м;
 P_{Λ} – опір кріплення, тс/м²;
 t_{Λ} – час перебування покрівлі в привибійному просторі, год;
 $a_{\Lambda}, b_{\Lambda}, c_{\Lambda}, n_{\Lambda}, K_{\Lambda}$ – емпіричні коефіцієнти, що мають значення для 1 класу покрівлі, наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Емпіричні коефіцієнти

Опускання покрівлі	a_{Λ}	b_{Λ}	c_{Λ}	n_{Λ}	K_{Λ}
Максимальні	6,00	0,0130	72,0	0,155	4,0
Середні	4,25	0,0100	45,0		5,0
Мінімальні	3,11	0,0103	28,3		9,5

$$\Delta l_{II} = \frac{1}{2} \left[(3,11 - 0,01P_{\Lambda} + 28,3 \cdot e^{-0,155P_{\Lambda}}) e^{-\frac{9,5}{t_{\Lambda}}} + (6,0 - 0,013P_{\Lambda} + 72,0 \cdot e^{-0,155P_{\Lambda}}) e^{-\frac{4}{t_{\Lambda}}} \right] l_{\Lambda} m_{\Lambda}. \quad (2.16)$$

Представимо ці залежності в узагальненому вигляді опускання покрівлі:

$$U = 0,01(a_{\Lambda} - b_{\Lambda}P_{\Lambda} + C_{\Lambda}e^{-n_{\Lambda}P_{\Lambda}})m_{\Lambda}x_{\Lambda}e^{-\frac{K_{\Lambda}}{t_{\Lambda}}}. \quad (2.17)$$

У разі тривалих зупинок очисного вибою (тобто $\vartheta_3 \rightarrow 0$): формула (2.17) матиме вигляд:

$$U = 0,01(a_{\Lambda} - b_{\Lambda}P_{\Lambda} + C_{\Lambda}e^{-n_{\Lambda}P_{\Lambda}})m_{\Lambda}x_{\Lambda}t_{\Lambda}^{0,56}. \quad (2.18)$$

Для формул (2.17) і (2.18) після приведення параметрів до гірничогеологічних умов Західного Донбасу, за рекомендаціями А. Орлова (1976), маємо $a_{\Lambda} = 6$; $b_{\Lambda} = 0,013$; $C_{\Lambda} = 72$; $n_{\Lambda} = 0,155$; $K_{\Lambda} = 4$; m_{Λ} – потужність вийманого пласта, м; x_{Λ} – відстань від лінії очисного вибою, м (у нашому випадку x_{Λ} приймаємо таким, що дорівнює напівширині привибійного простору); t_{Λ} – час знаходження даної точки покрівлі в інтервалі між лінією очисного вибою і відстанню x_{Λ} , год.

Формула (2.17) може відображати величину умовномиттєвих зміщень U_0 , якщо час перебування покрівлі в очисному вибої відповідає такій швидкості його посування, коли не встигає проявитися нелінійна складова зміщень. Ця обставина дає змогу стверджувати, що така умова реалізується за

відсутності прискорень у зміщеннях покрівлі, тобто $(d^2\vartheta/dt_\Lambda^2) = 0$. З рівняння (2.17) випливає, що для цього необхідно:

$$t_\Lambda = \frac{x_\Lambda}{\vartheta_3} = \frac{K_\Lambda}{2}. \quad (2.19)$$

Після диференціювання ϑ_3 швидкості посування вибою за змінною x_Λ з урахуванням рівняння (2.17) можна отримати, застосовуючи відомі вирази для радіуса кривизни:

$$R_0 = \frac{\left\{ 1 + \left[0,01 g_\Lambda m_\Lambda e^{-\frac{\vartheta_3 K_\Pi}{x_\Pi}} \left(1 + \frac{\vartheta_3 K_\Lambda}{x} \right) \right]^2 \right\}^{3/2}}{\left. \begin{array}{l} 0,01 g_\Lambda m_\Lambda \vartheta_3^{-2} K_\Lambda^2 e^{-\frac{\vartheta_3 K_\Lambda}{x_\Lambda}} x_\Lambda^{-3} \\ g_\Lambda = (a_\Lambda - b_\Lambda P_\Lambda + C_\Lambda e^{-n_\Lambda P_\Lambda}) \end{array} \right\}}, \quad (2.20)$$

де $\frac{x_\Lambda}{\vartheta_3}$ – визначається за співвідношенням (2.19).

Таким чином, знайдено всі необхідні дані для спільного чисельного розв'язування рівнянь (2.13) – (2.14) відносно R_{Lt} та R_L .

Процедуру чисельного аналізу здійснено методом послідовних наближень за заданої відносної точності 0,001. Чисельні розрахунки подано на рис. 2.3, а, б.

Ці графіки побудовано за таких вихідних даних: а) $m_\Lambda = 1$ м; $V_3 = 1$ м/доб; $\sigma_c = 10$ МПа; $E = 2500$ МПа; $\beta_3 = 2$; $P_\Lambda = 0,35; 0,56; 0,75$ МПа відповідно для графіків 1, 2, 3; б) $m_\Lambda = 1$ м; $\sigma_c = 10$ МПа; $E_\Pi = 2500$ МПа; $\beta_3 = 3$; $P_\Lambda = 0,35$ МПа; $V_3 = 1, 2, 3$ м/доб відповідно для графіків 1, 2, 3.

Прийняте положення про збереження гідростатичного розподілу напружень на контакті відносно міцних, водотривких і пухких водоносних порід під час руху очисного вибою підкріплено дослідженнями на спеціальному стенді для фізичного моделювання. Вплив цієї межі на динаміку формування зони водопровідних тріщин у покрівлі очисної виробки істотний, що показують розрахункові дані у вигляді наведених графіків (рис. 2.3).

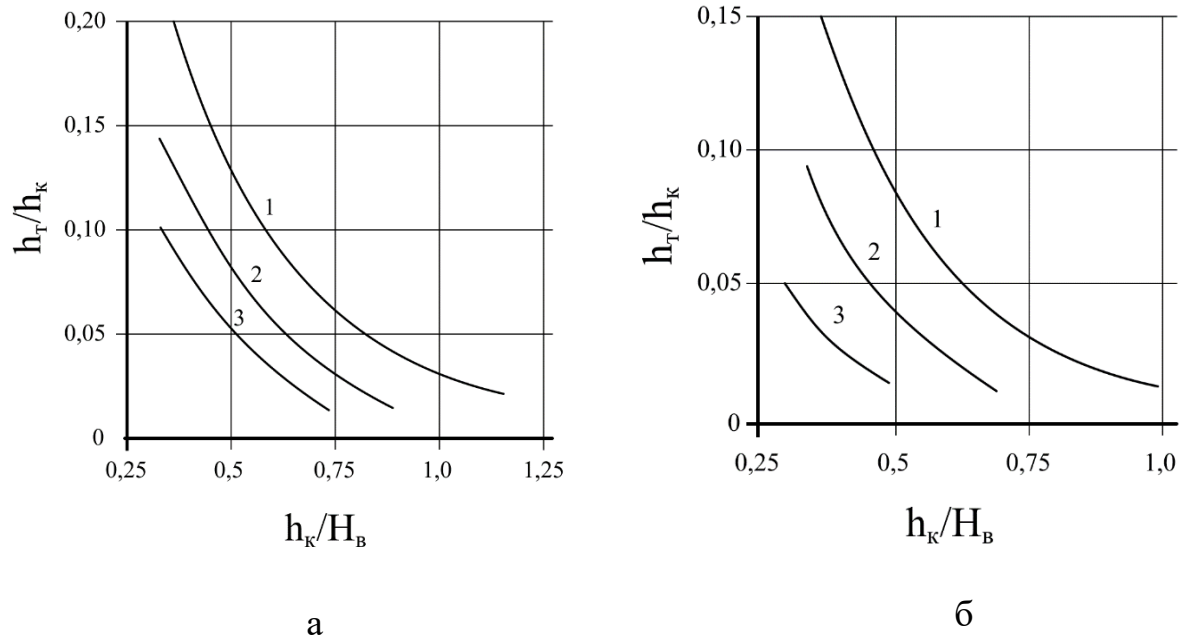


Рисунок 2.3 – Графіки безрозмірних співвідношень висоти водопроникної зони над очисною виробкою (h_T), потужності карбонівих порід між очисною виробкою та бучацьким водоносним горизонтом (h_K), потужності зони між денною поверхнею і підшовою водоносних порід (H_b)

Геомеханічні та фільтраційні збурення від проведення очисної виробки при моделюванні спричиняють практично рівномірне переміщення центральних і периферійних точок гідростатично навантаженої підшови бучацьких відкладень, а її сумарне осідання можна порівняти з об'ємом видобутого матеріалу із вибою виробки [74].

Отриманий результат підтверджує прийняття згаданої умови щодо (2.12) про гідростатичний розподіл напружень по підшві водоносного горизонту.

Необхідно зазначити, що постулативне прийняття цієї умови, що практикується в геомеханічних задачах, не настільки очевидне (наприклад, у зв'язку з цим потребує спеціального пояснення формування в районі Західного Донбасу доволі вираженої мульди зсуву над межами очисної виїмки).

Аналіз наведених та аналогічних їм графіків, що враховують практичний діапазон впливних параметрів показує, що гідростатичне поле напружень,

характерне для контакту пухких водонасичених і водотривких карбонів порід, інтенсифікує розвиток водопровідних тріщин у водозахисному шарі над лавою за умов, коли $h_k < H_b$.

Коли $h_k > H_b$ відмінності в розмірах водопровідного розпушення зумовлені більшою мірою міцнісними і деформаційними властивостями гірських порід, що складають покрівлю очисних виробок. Це узгоджується і зі спостережуваною на практиці тенденцією збільшення здимання порід у підготовчих виробках у міру наближення до межі покривних відкладень. Причому, це явище спостерігається і в похилій частині шахтних полів, де знеміцнення гірських порід поблизу зазначених меж не позначається. У всіх випадках на цей процес помітно впливають швидкість посування очисного вибою і питомий опір кріплення в підтримуваному просторі лави. Так, зміна питомого опору кріплення в діапазоні 0,35 – 0,75 МПа знижує водопровідне тріщинне розпушення покрівлі порівняно зі зміною швидкості посування очисного вибою в межах 1 – 3 м/доб.

2.2 Аналітичний вибір методу оцінки параметрів керування геофільтрацією в порушеному гірничими роботами масиві шахтного поля

Наведена вище емпірично-аналітична оцінка геофільтраційного стану породного масиву на шахтному полі показує, що система «водоносні породи – гірничі виробки» відноситься до багатофакторних і складноорганізованих. Факторна ієрархія дії природних і технологічних процесів на геофільтраційний стан підробленого породного масиву навколо виробки зумовлює різні підходи до їх кількісного врахування. Аналітичні оцінки позитивні в частині діапазонної параметризації процесів, проте їм притаманні відомі в геомеханіці та гідродинаміці недоліки: ідеалізація властивостей масиву, а також схематизація та спрощення крайових умов.

Найдоцільніший варіант кількісного оцінювання геофільтраційного стану гірського масиву диктується потребами гірничої практики, коли роль широкого діапазону технологічних і конструктивних заходів керування процесом буде деталізовано, а отже, з'явиться можливість їх гнучкого компонування. Відомо [75], що найперспективнішими в реалізації цього напрямку є чисельні методи математичного моделювання.

В.В. Виноградов [76] вказує на спільність процесу керування технічних систем, що описуються звичайними диференціальними рівняннями, і гірського масиву навколо виробки. Як фізичні величини, що характеризують стан гірського масиву, автор називає компоненти полів напружень і деформацій, міцнісні та реологічні властивості порід, ступінь їх порушеності. Логічною є аналогія розгляду такого підходу до геофільтраційного стану гірського масиву, якщо додатково врахувати наявність полів фільтраційних напорів і швидкостей, проникності, пружності гірських порід та інших фізичних параметрів.

Функціонал керування технічної системи представляють у вигляді [76]:

$$\int_0^{T_y} f_0(x(t), u(t), a, t) dt + F_0(a, x(t_0), x(T_y)), \quad (2.21)$$

де a – вектор, що описує параметри об'єкта;

t – поточний час від початку процесу з моменту t_0 ;

T_y – тривалість переходу системи у фазі керування;

$x(t), u(t)$ – векторні функції фазової траєкторії та керування процесом (тобто координатна зміна фізичного процесу, що характеризує описуваний процес).

Допустимі межі зміни фазових станів і змін функцій керування визначають крайові умови області, де мінімізується функціонал (2.21).

У більшості керованих технічних систем траєкторія фазового переходу в заданому стані не регламентується. Таке трактування формалізації процесу керування геофільтраційним станом гірського масиву не може бути прийнятим, оскільки фазові перетворення гірського масиву найчастіше є незворотними, пов'язані з появою нових властивостей, які потребують врахування. Наприклад, основна частина деформацій у позамежній стадії навантаження гірських порід (їх руйнування) веде до накопичення незворотної проникності внаслідок макро- і мікроруйнування, а міцність породи прагне до стабільної (залишкової). Природно, що функції керування в цьому разі обрано найкращим чином, якщо ділянки масиву із зазначеним станом не з'являться або будуть переміщені в безпечні зони керованої ділянки. Важливою у зв'язку з цим є і прогнозована поява високих швидкостей фільтрації, які можуть створити аварійні ситуації в гірничих виробках.

Прийmemo, що необхідною і достатньою умовою вибору методу математичного моделювання геофільтраційного стану гірського масиву, як керованої системи, буде фізико-математична схожість методу з функціоналом (2.21).

Математичні задачі теорії пружності в чисельній постановці можуть формулюватися мінімізацією функціоналу [77]:

$$\Phi = \Pi_e + \iiint_{\Omega} \sum_{i=1}^3 f_i u_i d\Omega - \iint_{\Gamma_2} \sum_{i=1}^3 u_i g_i d\Gamma, \quad (2.22)$$

де Π_e – потенційна енергія напружено-деформованого стану тіла об'ємом Ω , виражена через компоненти тензора напружень або компоненти тензора деформацій, що відображають переміщення u_i під дією об'ємних сил f_i , а також поверхневих сил g_i на ділянці Γ_2 загальної поверхні.

Варіант стабільного стану тіла відповідає переміщенням, що приносять мінімум функціоналу (2.22) у класі функцій, які задовольняють крайовим умовам на межі:

$$u = g(x_1, x_2, x_3); (x_1, x_2, x_3) \in \Gamma_1. \quad (2.23)$$

Постановка задачі конкретизується пошуком, наприклад, переміщення для системи диференціальних рівнянь рівноваги:

$$\sum_{K=1}^3 \frac{\partial \sigma_{iK}}{\partial x_K} + f_i = 0, i = 1, 2, 3 \quad (2.24)$$

за обумовлених вище крайових умов (2.23) і виражених умов навантаження межі Γ_2 у вигляді відомих співвідношень:

$$\sum_{i=1}^3 \sigma_{iK} \cos(n, x_K) + g_i = 0; i = 1, 2, 3; (x_1, x_2, x_3) \in \Gamma_2. \quad (2.25)$$

Нестаціонарна фільтрація рідини в шаруватому пористому середовищі відображується рівнянням рівноваги:

$$\eta^\alpha \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.26)$$

з крайовими умовами

$$(x, y) \in \Omega_t, t \in (0, T), \quad (2.27)$$

$$h = h_1, (x, y) \in \Gamma_1, \quad (2.28)$$

$$R_x \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + K_y \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) = \beta_{f1}, (x, y) \in \Gamma_2, \quad (2.29)$$

$$K_x \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + K_y \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) = -\mathcal{L}_f h + \beta_{f2}, (x, y) \in \Gamma_3. \quad (2.30)$$

За початкових умов

$$h(x, y, 0) = h_0(x, y), (x, y) \in \Omega_t. \quad (2.31)$$

У наведених виразах:

σ – напруження в області;

h – гідродинамічний напір у будь-якій точці координат x, y фільтрувальної області Ω_t ;

K_x, K_y – коефіцієнти фільтрації у напрямку відповідних координатних осей;

η^α – коефіцієнт пружності водоносних порід розглянутої області;

n – зовнішня нормаль;

$\mathcal{L}_f, \beta_{f1}, \beta_{f2}$ – відомі параметри;

$\Gamma_{i(i=1,2,3)}$ – ділянки межі фільтрувальної області, на яких задано умови першого, другого і третього ряду.

Розв’язання рівнянь (2.24) – (2.31) здійснюється методами скінчених різниць (МСР) і методом скінчених елементів (МСЕ) [75] – [77], орієнтованими на застосування сучасних обчислювальних засобів. Вони дають змогу дискретизувати розглянуту неоднорідну ділянку геофільтраційного стану гірського масиву так, щоб рівень необхідної чисельної апроксимації відповідних рівнянь (2.24), (2.26) задовольняв вимогам збіжності ітераційного процесу й водночас давав необхідну практичну точність показників, які можна розглядати як параметри керування геофільтраційним станом гірського масиву. До них можна віднести міцнісні та деформаційні властивості охоронних елементів гірничих виробок, силові параметри кріплень, залишкові під час затоплення властивості технологічних перетворень ділянок масиву (наприклад, контактна міцність гідродинамічно стратифікованих або попередньо підроблених гірських порід), геометричну конфігурацію та розміри виробок тощо.

Таким чином, з прийняттям методів МСЕ і МСР для опису геофільтраційного стану гірського масиву, можна вважати виконаною поставлену умову керованості системи «водоносні породи – гірничі виробки».

2.3 Ідентифікація модельних рішень і реальних геофільтраційних об'єктів методом електрогідродинамічних аналогій за даними натурних вимірювань і моделювання на еквівалентних матеріалах

Для створення чисельних моделей геофільтрації в зоні геомеханічної дії гірничих виробок необхідний ретельний облік взаємозв'язку між чисельними значеннями деформацій і фільтраційними параметрами. Як основні передумови до визначення методик таких досліджень можна прийняти відомості про те, що інформативним критерієм ступеня тріщинної порушеності порід у зоні впливу гірничих виробок є величина відносних деформацій, а проникність пропорційна їх геометричним розмірам. У даній роботі ці передумови реалізовано із застосуванням фізичного моделювання. Гідрогеомеханічна ситуація відображає реальні умови підробки очисною виробкою пласта S_6 , раніше відпрацьованого пласта S_6^1 у лаві 529 шахти «Ювілейна» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» Західного Донбасу.

Чисельну геомеханічну модель пружно-пластичного деформування шаруватих гірських порід із позамежним знеміцненням, ослабленими контактами зчеплення і тертя між шарами прийнято з урахуванням її реалізації та алгоритму, наведених у [79]. У процесі досліджень було використано два варіанти профільних геомеханічних моделей, які збігаються зі схемою породної півсфери, що підробляється (див. п. 2.1). Область було розбито на 390 трикутних елементів уздовж очисного вибою і перпендикулярно вздовж осі погашеного виїмкового штрека верхнього відпрацьованого пласта, де область моделювання містила 131 трикутний елемент. Показники фізико-механічних властивостей гірських порід змінювалися в діапазоні, характерному для центральної та східної частин Західного Донбасу.

Для наближення до реального поля деформацій у площині моделювання, що збігається з лінією очисного вибою, було застосовано коригування з урахуванням принципу суперпозиції.

Це необхідно з огляду на те, що на моделі в перпендикулярній площині виявляється помітний градієнт деформацій у межах закріпленого простору лави. Коригування виконано алгебраїчним підсумовуванням деформацій обох варіантів моделей для елементів, що суміщуються пошарово. Збіжність гео-механічних розрахунків контролювалася порівнянням розрахункових опускань посадкового ряду кріплення в лаві та їх вимірних величин (рис. 2.4). Крім того, було досягнуто співпадання контурів височування води з покрівлі очисної виробки та розмірів області з деформаціями тріщинного розпушення на моделі.

Величини отриманих деформацій розпушення порід у різних елементах модельованої області змінювалися в межах $1,92 \cdot 10^{-4}$ – $58,9 \cdot 10^{-4}$ для горизонтальних деформацій та $1,12 \cdot 10^{-2}$ – $2,13 \cdot 10^{-2}$ – для деформацій зсуву.

Імітаційний пошук параметрів проникності (коефіцієнтів фільтрації) зони підробки здійснено методом аналогового моделювання на електрон-теграторі БУСЕ-70 (рис. 2.5) з урахуванням наведених вище посилань для чисельного моделювання.

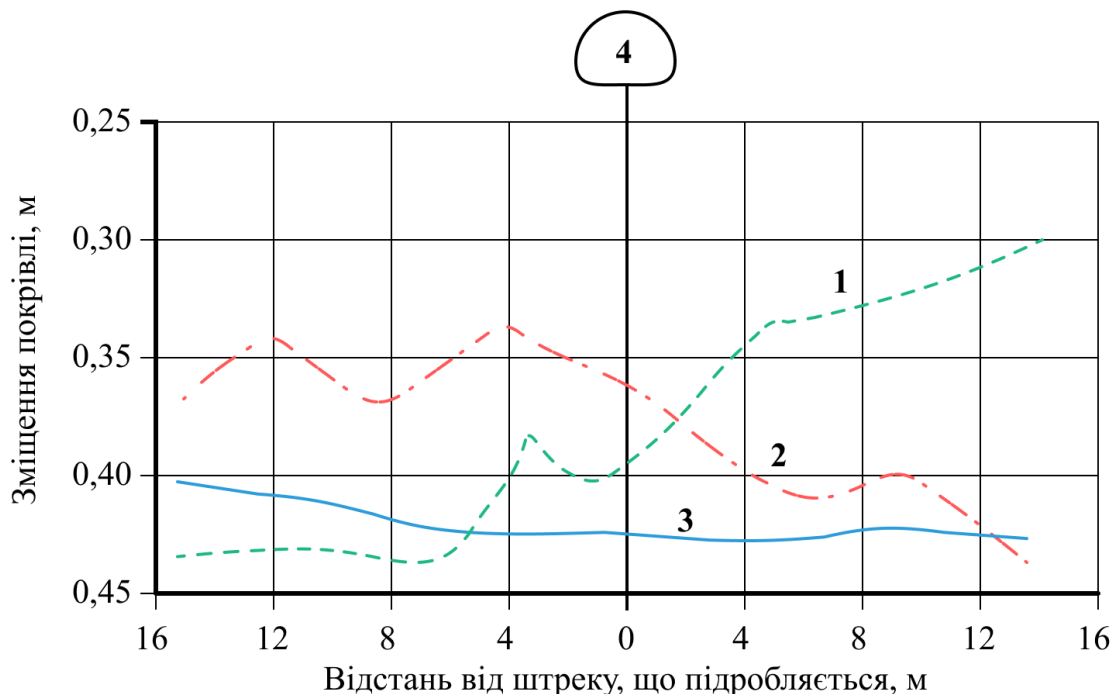


Рисунок 2.4 – Співставлення вимірних (1, 2) і модельних (3) зміщень покрівлі над посадковим рядом кріплення в 529 лаві шахти «Ювілейна» під час підробки виїмкового штреку (4)

Для вибору початкового варіанта резисторної моделі було виконано нижченаведені розрахункові обґрунтування.

Обчислено значення коефіцієнтів фільтрації для трикутних елементів геомеханічної моделі породного масиву за формулами:

$$K_i = \frac{K_{min}\epsilon_{xi}}{\epsilon_{x,min}}, \quad K_i = \frac{K_{min}\epsilon_{xy,i}}{\epsilon_{xy,min}}, \quad (2.32)$$

де K_{min} – мінімальне вихідне значення коефіцієнта фільтрації (прийнято орієнтовно);

$\epsilon_{xi}, \epsilon_{xy,i}$ – вихідні значення суперпозиційних горизонтальних і зсувних деформацій в i -му скінченному елементі чисельної моделі.

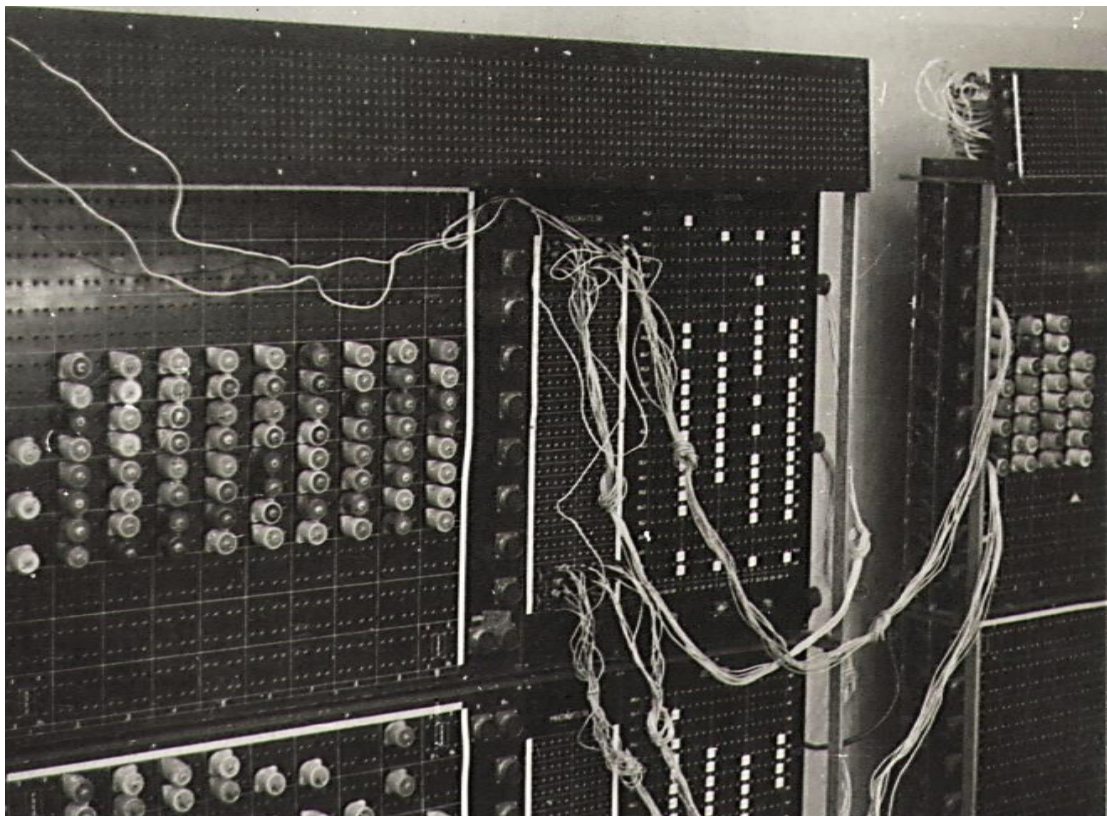


Рисунок 2.5 – Монтажна схема резисторної електрогідродинамічної моделі на електроінтеграторі БУСЕ-70

Обчислено середньозважені коефіцієнти фільтрації за площею прямокутних резисторних блоків:

$$K_j, cb = \frac{\sum_1^n K_i f_i}{\sum_1^n f_i}, \quad (2.33)$$

де f_i – площа трикутного i -го елемента (або його частини) чисельної геомеханічної моделі, що входить до розраховуваного j -го прямокутника блока електроінтегратора.

Резисторну модель (рис. 2.5) розраховано за відомою методикою (Л. Лукнер, 1976). У результаті отримано основні параметри моделювання: масштаби напорів $\mathcal{L}_H=1,0$ м/в; коефіцієнт опору $\mathcal{L}\phi=5\cdot 10^{-4}$ доба/м²·Ом; співвідношення $\mathcal{L}_H/\mathcal{L}\phi = 0,2\cdot 10^4$ м³/добу·А; початкові значення електричних опорів моделі знаходилися в межах 4,24 – 662,1 кОм.

Формула (2.33) передбачає лінійний зв'язок деформацій і проникності. Прийняту умову обґрунтуємо посиланням на бездоганні лабораторні експерименти А. Михалюка [78], у яких виразно простежується лінійний зв'язок проникності та об'ємних деформацій зразків гірських порід в умовах нерівнокомпонентного стиску (див. рис. 2.6).

Наведені обґрунтування дали змогу виконати імітаційне моделювання, водночас максимальний перепад напору модельованої області фільтрації становив 8,1 м, мінімальний напір збігається з поверхнею покрівлі в лаві й дорівнює нулю (контур стоку). Виходячи з цього та наведених розрахункових параметрів, у вузли моделі було подано відповідні потенціали.

Аналіз зафіксованих при цьому величин струмів показав, що модельований водоприплив в очисний вибій у межах зони деформацій розпушування дорівнює $28,2\cdot 10^{-3}$ м³/год і є значно більшим, ніж зафіксований натурними вимірами, у межах $15\cdot 10^{-3} - 20\cdot 10^{-3}$ м³/год. Після коригувального збільшення опорів резисторної моделі в 1,6 рази й подальших операцій модельований водоприплив становив $16,7\cdot 10^{-3}$ м³/год, тобто практично збігся із середнім значенням фактичного припливу в очисний вибій.

Отримані дані відображають поле напору фільтрувальної ділянки гірського масиву. Коефіцієнт фільтрації в окремих блоках моделі коливався в межах 0,006 – 0,192 м/добу.

Коригування моделі на основі зсувних деформацій (див. формулу 2.32) призводять до значень коефіцієнта фільтрації 0,031 – 0,101 м/добу.

У зв'язку з тим, що ідентифікацію резисторної моделі здійснено за припливом в очисний вибій, а його вимір пов'язаний зі значними труднощами, було виконано модельний аналіз залежності водоприпливів від розмірів контуру його розтікання по лаві. Остання величина досить просто фіксується протягом робочої зміни в очисному вибої.

Імітація зміни контуру розтікання здійснювалася відключенням опорів у відповідних рядах резисторів. Графіки, що ілюструють залежність довжини контуру розтікання по лаві від величини припливу, наведено на рис. 2.7.

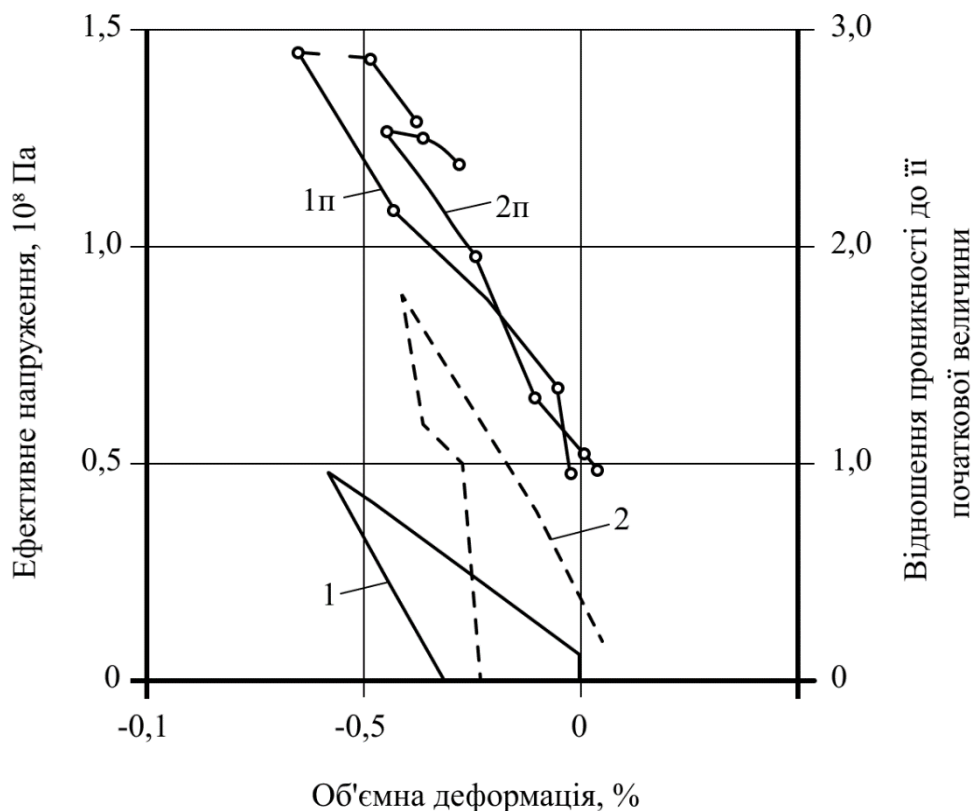
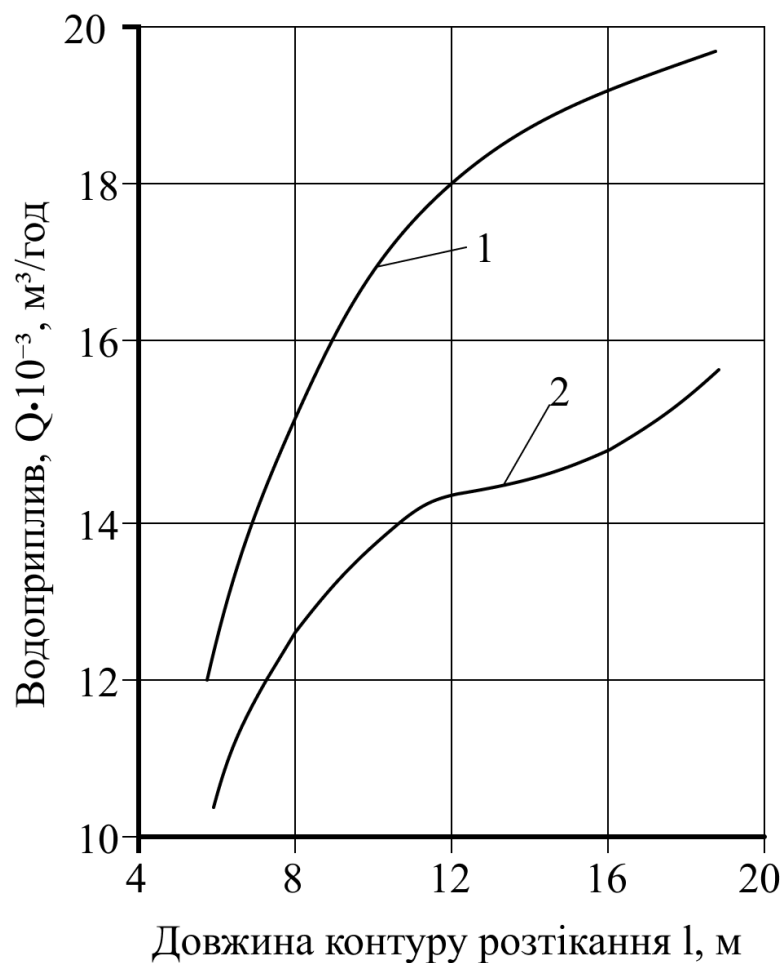


Рисунок 2.6 – Залежність проницкості зразків алевролітів від нерівнокомпонентного стиснення (за А. Михалюком): зміна об'ємної деформації (1, 2) і проницкості (1п, 2п) за відповідного співвідношення радіального та осевого навантаження 0,05 і 0,15

Видно, що помітна похибка в моделюванні накопичується у разі зміни довжини контуру розтікання понад 1,5 – 2,0 м, тобто вимір положення контуру відносно секцій механізованого кріплення (розмір $\sim 1,5$ м) може слугувати надійною вихідною величиною для контролю ідентифікації моделі за динамікою виробничих процесів у лаві. Це важливо, наприклад, під час модельної апробації технологічних варіантів керування проникністю породного масиву в очисних виробках. Позитивний досвід його застосування накопичено в Західному Донбасі під час відпрацювання 529-ї лави на шахті «Ювілейна».



- 1 – під час моделювання фільтрації з використанням горизонтальних деформацій розрихлення за напрямком нашарування гірських порід;
 2 – те ж, із використанням деформацій зсуву

Рисунок 2.7 – Зміна водоприпливу в лаву (Q) за різної довжини контуру розтікання (l) уздовж лінії очисного вибою

З наведених даних випливає, що коефіцієнт пропорційності між горизонтальними відносними деформаціями та коефіцієнтом фільтрації (м/добу) у шаруватому знеміцненому масиві порід з початковою міцністю на одноосьове стиснення до 40 МПа становить 31,25 – 33,10. Те саме для зсувних деформацій – 2,78 – 4,73.

Коливання зазначених величин пояснюється тим, що підбір моделі здійснювали за допомогою стандартного комплекту резисторів із забезпеченням допустимих меж відхилень фактичної та розрахункової величин опору не більше 10%. Для використання коефіцієнтів у чисельних моделях потрібен попередній геомеханічний аналіз досліджуваної області з метою встановлення переважних чинників, що порушують її проникність.

Таким чином, можна зробити висновок, що більш ґрунтовним при інтегруванні чисельних моделей слід вважати паралельне застосування як горизонтальних, так і зсувних деформацій.

Для розширення діапазону гірничо-геологічних умов, за яких можливе вивчення геофільтраційного стану гірського масиву, досліджено кількісні співвідношення між проникністю та геомеханічною порушеністю слабких порід. Гідрогеологічний аналіз показує, що відкладення цих порід, як правило, формують основний фон геофільтраційного стану породного масиву в шахтах.

Натурні аналоги області масиву, описані вище для слабких порід, відсутні. У зв'язку з цим досліджено підробку шаруватої товщі з еквівалентного матеріалу, виконану Е. Бошенятовим. Деякі дані про експеримент були люб'язно надані в наше розпорядження.

Масштаб моделювання становив 1:100. Потужність модельних шарів підроблюваної товщі варіювали в межах 4 – 50 мм, загальна потужність підроблюваного масиву – 224 – 554 мм, довжина очисної виробки в напрямкусування очисного вибою – 400 – 800 мм.

Об'ємна вага еквівалентного матеріалу із суміші глини, піску та масла змінювалася в значному діапазоні – 1,0 – 2,3 г/см³, міцність матеріалу на одновісне стиснення склала 0,02 – 0,15 МПа.

Після підробки проводилося видалення шарів зверху вниз із залишенням загальної потужності 65 – 530 мм. Для кожного залишеного інтервалу визначали проникність шляхом фільтрування азоту під тиском. Вимірний діапазон проникності становив 0,02 – 310 мкм².

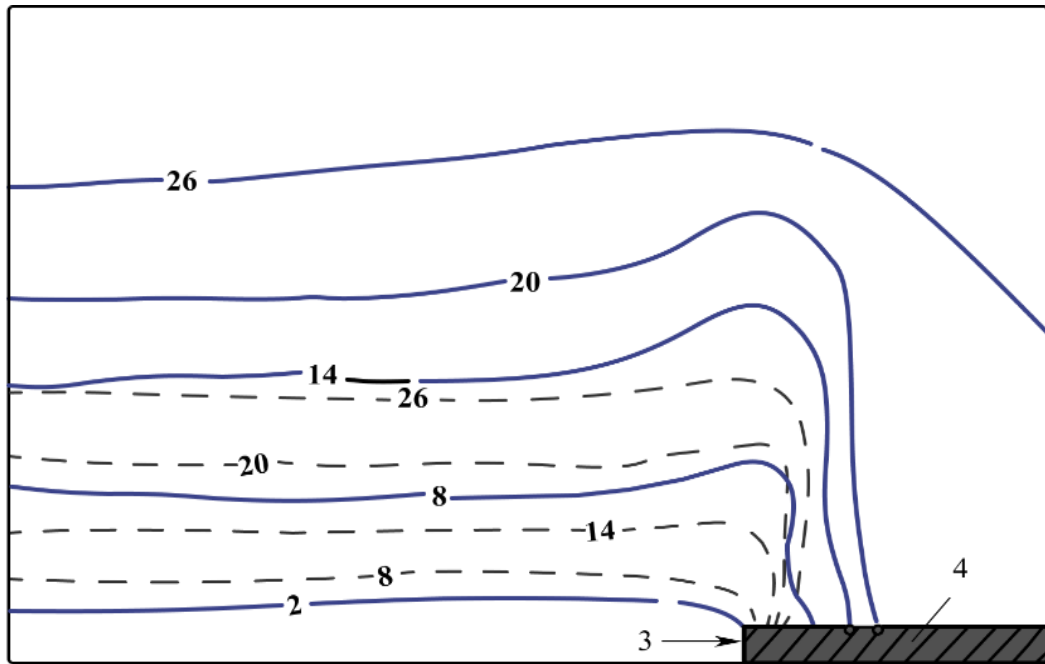
Чисельна геомеханічна модель для адекватного відтворення картини напружень і деформацій геометрично повторювала вже описану фізичну модель. Для зручності її резисторної ідентифікації на електроінтеграторі БУСЕ-70, трикутні скінченні елементи склали в парні прямокутники. Кожен резисторний блок, що моделює фільтраційний опір прямокутного блока скінченних елементів, складався за схемою, що дає змогу відтворити проникність у горизонтальному і вертикальному напрямках пропорційно отриманим деформаціям.

Імітаційне моделювання, як і наведене вище, проводили в пропорційній корекції опорів резисторів до отримання необхідної збіжності з проникністю, вимірною на фізичній моделі з еквівалентного матеріалу. Параметри моделювання: масштаб напору $\mathcal{L}_H = 3,0$ м/в; коефіцієнт опору $\mathcal{L}_\phi = 1 \cdot 10^{-4}$ доба/м²·Ом; $\mathcal{L}/\mathcal{L}_\phi = 3 \cdot 10^4$ м³/добу·А; максимальний напір – 30 м; максимальний потенціал – 10 В.

На рис. 2.8 показано ізолінії модельних напорів за різної залишкової потужності підробленої товщі. Для ілюстрації якісної адекватності отриманого фізичного поля напорів наведено дані про ступінь геомеханічної порушеності гірського масиву.

Чисельний зв'язок проникності піщано-глинистого матеріалу та горизонтальних деформацій, які формують зміну проникності, характеризується співвідношенням:

$$K_\phi = 200(\epsilon_x) + 0,013, \text{ м/добу.} \quad (2.34)$$



☐ – 1, ☐ – 2 – відповідно для потужності водотривкої покрівлі 25,6 м та 8,8 м;

3 – лінія вибою; 4 – вугільний пласт

Рисунок 2.8 – Ізолінії модельних напорів у підробленій товщі під час ідентифікації чисельної геомеханічної та електрогідродинамічної моделей

На рис. 2.8 видно, що фільтраційні напори мають найбільші градієнти навколо очисного вибою. Інтенсивність зміни проникності у вертикальних перерізах підробленої товщі охоплює діапазон, який можна порівняти з комплексом модельних і натурних даних [71].

2.4 Математична основа комп'ютерного моделювання процесу фільтрації підземних вод під час експлуатації та затоплення шахт

Для відображення закономірностей техногенного режиму підземних вод гідрогеологічні прогнози ґрунтуються на розв'язанні основного диференціального рівняння несталої фільтраційної течії, яке для двовимірного в плані потоку підземних вод має відомий вигляд:

$$T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \pm W = \mu \cdot \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (2.35)$$

де H – шукана функція напору;

T_x, T_y – провідність водоносного шару за лінійними координатами x та y , відповідно;

W – живлення одиничної витрати потоку в розрахункову область потоку;

μ – питома ємність водовмісного середовища;

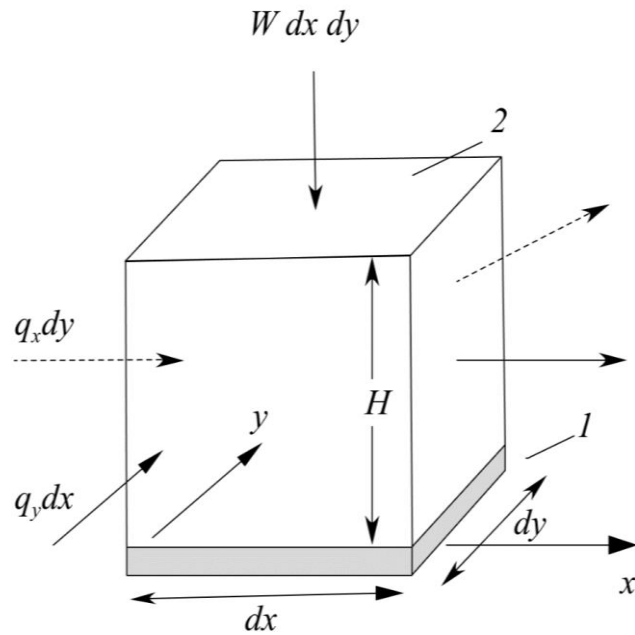
t – час.

Дискретний елемент планового фільтраційного потоку показано на рис. 2.9.

Початкові та граничні умови, за яких розв'язують рівняння (2.35), формуються залежно від конкретних природних і техногенних чинників і заданих умов збурення потоку підземних вод.

Серед чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь фільтрації найбільшого поширення набули скінченно-різницеві методи [16], [79] – [82] основані на явній і неявній різницевих схемах.

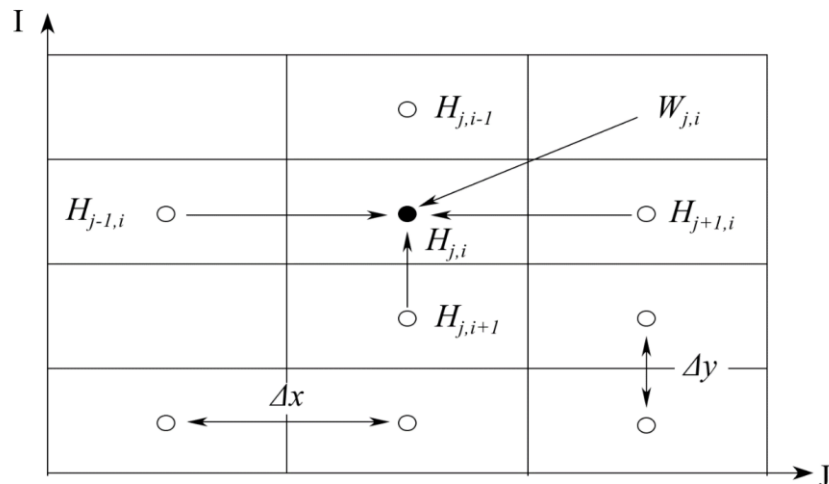
Скінченно-різницева апроксимація ґрунтується на дискретному поданні геофільтраційного потоку в просторі та часі, за якого безперервне фільтраційне поле $H(x, y, t)$ замінюється фіктивною сітковою областю, що характеризується величинами напорів $H(x_j, y_i, t_k)$ у всіх вузлових точках сітки у ряді моментів часу з кроком Δt (рис. 2.10.).



1 – водотрив; 2 – вільна поверхня;

q_x та q_y – одиничні витрати в напрямку координатних осей X та Y ;
 H – шукана функція напору (висоти стовпа води); W – живлення одиничної витрати потоку: для потоку, що входить у розрахункову область $W > 0$
 для вихідного потоку $W < 0$

Рисунок 2.9 – Дискретний елемент планового фільтраційного потоку



$H_{j,i}$ – значення напору в блоці j, i ; $W_{j,i}$ – величина припливу (відтоку) в розрахунковому блоці j, i ; Δx , Δy – відстань між центрами блоків по осях j, i

Рисунок 2.10 – Схема до складення й аналізу балансових скінченно-різницевого рівнянь

Фільтраційний опір (величина зворотна водопровідності) між центрами сусідніх блоків є відношенням зміни напору до витрати потоку на обраній ділянці (доб/м²)

$$\Phi = \frac{\Delta H}{Q} = \frac{\Delta H}{K\omega \frac{\Delta H}{\Delta x}} = \frac{\Delta x}{K\omega}, \quad (2.36)$$

де ω – площа поперечного перерізу потоку підземних вод, м²;

K – коефіцієнт фільтрації в напрямках x , y (як правило $K_x = K_y$,

$$T_x = T_y = T).$$

Для планового площиннопаралельного потоку підземних вод шириною Δy рівняння (2.36) набуває вигляду:

$$\Phi = \frac{\Delta H}{q\Delta y} = \frac{\Delta H}{T\Delta y} = \frac{\Delta H}{T\Delta y \Delta H / \Delta x} = \frac{\Delta x}{T\Delta y}. \quad (2.37)$$

Під час руху води перпендикулярно до межі поділу середовищ із різною провідністю їх середнє значення для ділянок $[x_{j-1}, x_j]$, $[x_j, x_{j+1}]$ та $[x_{i-1}, x_i]$, $[x_i, x_{i+1}]$ обчислюють за формулами:

$$T_{j-1,j} = \frac{2}{\frac{1}{T_{j-1}} + \frac{1}{T_j}}, \quad T_{j,j+1} = \frac{2}{\frac{1}{T_j} + \frac{1}{T_{j+1}}},$$

$$T_{i-1,i} = \frac{2}{\frac{1}{T_{i-1}} + \frac{1}{T_i}}, \quad T_{i,i+1} = \frac{2}{\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_{i+1}}}.$$

Для подання диференціального рівняння балансу підземних вод (2.35) у скінченно-різницевій формі похідні напору в розрахунковій точці виражають через різниці значень напору на кінцях просторових або часових інтервалів, віднесених до відстані між межами суміжних блоків.

Скінченно-різницева апроксимація (2.35) має вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{H_{j-1,i}^t - H_{j,i}^t}{\Phi_{j-1,j}} - \frac{H_{j,i}^t - H_{j+1,i}^t}{\Phi_{j,j+1}} + \frac{H_{j,i-1}^t - H_{j,i}^t}{\Phi_{i-1,i}} - \frac{H_{j,i}^t - H_{j,i+1}^t}{\Phi_{i,i+1}} \pm \\ & \pm W_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i = \mu_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i \frac{H_{j,i}^t - H_{j,i}^{t-\Delta t}}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Фільтраційний опір (Φ) потоку між розрахунковими блоками, виражають через розміри блоків (Δx , Δy) і значення водопровідностей (T)

$$\begin{aligned} \Phi_{j-1,j} &= \frac{2\Delta y_i T_{j,i} T_{j-1,i}}{T_{j,i} \Delta x_{j-1} + T_{j-1,i} \Delta x_j}; & \Phi_{j,j+1} &= \frac{2\Delta y_i T_{j,i} T_{j+1,i}}{T_{j,i} \Delta x_{j+1} + T_{j+1,i} \Delta x_j}; \\ \Phi_{i-1,i} &= \frac{2x_j T_{j,i} T_{j,i-1}}{T_{j,i} \Delta y_{i-1} + T_{j,i-1} \Delta y_j}; & \Phi_{i,i+1} &= \frac{2x_j T_{j,i} T_{j,i+1}}{T_{j,i} \Delta y_{i+1} + T_{j,i+1} \Delta y_j}. \end{aligned}$$

Параметр W , що відображає живлення (або розвантаження) водоносного пласта за площею поширення, у даній постановці задачі відображає перетікання через слабопроникні шари. Його чисельне значення визначається співвідношенням:

$$W = \frac{H - H'}{\frac{m_0}{k_0}},$$

де H , H' – напори підземних вод у розглянутому та суміжних водоносних горизонтах:

k_0 , m_0 – коефіцієнт фільтрації та потужність поділяючого шару.

Визначивши шукане значення напору $H_{j,i}^t$ і позначивши співмножники при рівнях через коефіцієнти $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \mathcal{L}$, можна отримати:

$$H_{j,i}^t = \frac{\beta_1}{\mathcal{L}} H_{j-1,i}^t + \frac{\beta_2}{\mathcal{L}} H_{j+1,i}^t + \frac{\beta_3}{\mathcal{L}} H_{j,i-1}^t + \frac{\beta_4}{\mathcal{L}} H_{j,i+1}^t + \frac{1}{\mathcal{L}} W_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i + \frac{\beta_5}{\mathcal{L}} H_{j,i}^{t-\Delta t}, \quad (2.39)$$

де

$$\beta_1 = \frac{T_{j,i} \Delta x_{j-1} + T_{j-1,i} \Delta x_j}{2 \Delta y_i T_{j,i} T_{j-1,i}}; \quad \beta_2 = \frac{T_{j,i} \Delta x_{j+1} + T_{j+1,i} \Delta x_j}{2 \Delta y_i T_{j,i} T_{j+1,i}};$$

$$\beta_3 = \frac{T_{j,i} \Delta y_{i-1} + T_{j,i-1} \Delta y_i}{2 \Delta x_j T_{j,i} T_{j,i-1}}; \quad \beta_4 = \frac{T_{j,i} \Delta y_{i+1} + T_{j+1,i} \Delta y_j}{2 \Delta x_j T_{j,i} T_{j,i+1}};$$

$$\beta_5 = \frac{\mu_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i}{\Delta t}; \quad \mathcal{L} = \sum_{i=1}^5 \beta_i.$$

Рівняння (2.39) являє собою неявну скінченно-різницеву схему, де визначення невідомого значення напору $H_{j,i}^t$ стає можливим після розв'язання системи рівнянь (2.39) для всіх вузлових точок сітки на момент часу t .

У разі, якщо похідні $\frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$ та $\frac{\partial^2 H}{\partial y^2}$ у вихідному диференціальному рівнянні виражені через значення напорів, що відповідають початку розрахункового часового інтервалу, стає можливим у явному вигляді отримати шукане значення рівняння $H_{j,i}^t$. Часто нестійкість явної схеми при певних співвідношеннях величин Δt , Δx , Δy , T та ємності робить її застосування обмеженим. Тому в практиці чисельного моделювання фільтрації основного розвитку набули неявні та явно-неявні схеми, стійкість і збіжність яких математично доведено.

Найпростішим прикладом явно-неявної схеми може слугувати таке скінченно-різницеве подання рівняння (2.35)

$$(H_{j,i}^t - H_{j,i}^{t-\Delta t}) \beta_5 = \sigma \left[\frac{\beta_1 H_{j-1,i}^t + \beta_2 H_{j+1,i}^t + \beta_3 H_{j,i-1}^t + \beta_4 H_{j,i+1}^t}{\mathcal{L}} \right] + (1 - \sigma) \left[\frac{\beta_1 H_{j-1,i}^{t-\Delta t} + \beta_2 H_{j+1,i}^{t-\Delta t} + \beta_3 H_{j,i-1}^{t-\Delta t} + \beta_4 H_{j,i+1}^{t-\Delta t}}{\mathcal{L}} \right] + \frac{1}{\mathcal{L}} W_{j,i} \Delta x_j \Delta y_i, \quad (2.40)$$

де σ – ваговий коефіцієнт, визначений у межах $0 \leq \sigma \leq 1$.

При $\sigma = 1$ рівняння (2.40) переходить у неявне рівняння (2.39), при $\sigma = 0$ – набуває явного вигляду, а при проміжних значеннях – стає явно-неявним. Геофільтраційні задачі, як правило, розв’язують ітераційними методами, сутність яких полягає в послідовному наближенні одержуваного розв’язку до точного. Критерієм завершення ітераційного процесу є умова близькості результатів двох послідовних ітерацій:

$$\max_{j,i} |H_{j,i}^{k+1} - H_{j,i}^k| \leq \xi.$$

Вважається, що розрахункова ітерація відрізняється від точного розв’язку не більше, ніж на задане мале число ξ . Додатковим критерієм слугує дотримання потокового балансу по всій області фільтрації.

Отже, завершаючи викладений розділ дисертаційної роботи, слід відзначити, що його зміст дає підстави стверджувати про достатню наявність фізичних і аналітичних обґрунтувань для подальшого ґрунтового підходу з побудови тривимірної моделі шахтного поля зі складною гідрогеологічною будовою.

Висновки до розділу

Виходячи з попереднього висновку (Розділ 1) щодо складання методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля з автоматизацією процесу керування гідроекобезпекою, було досліджено фізичний стан об’єкта шляхом натурних і лабораторних експериментів, фізичного моделювання та емпіріоаналітичних обґрунтувань і математичного опису елементів побудови послідовності комп’ютерних моделей:

1. За геофізичними вимірами деформації надвугільної товщі у свердловинах над рухомим очисним вибоєм отримано графіки параметрів деформування гірських порід у часі, які інтерпретовані за класичним рівнянням з ядром Абеля з новим фізичним змістом, як параметри пружно-реологічної піддатли-

вості масиву, що необхідно для тлумачення нелінійності фільтраційних геомеханічних змін у моделях.

2. Надано пояснення і доказ гідростатичного розподілу напружень у подошві бучацького водоносного горизонту, де при моделюванні фільтраційні збурення спричиняють практично рівномірне переміщення центральних і периферійних точок з об'ємом мульди зсуву, рівним об'єму водовмісного піщаного матеріалу.

3. Показано, що суміщення чисельних алгоритмів математичного моделювання методами скінченних різниць і методом скінченних елементів відповідає загальному принципу керованості технічних систем, якою є система «водоносні породи – гірничі виробки».

4. Імітаційний пошук параметрів проникності зони підробки очисним вибоєм здійснено аналоговим моделюванням на резисторній електрогідродинамічній моделі та співставленням результатів з параметрами розтікання води в лаві, що дозволяє дійти висновку про паралельне застосування горизонтальних і зсувних деформацій при інтегруванні чисельних моделей.

5. Показано, що математичною основою комп'ютерного моделювання процесу геофільтрації при експлуатації та затопленні шахт є чисельне розв'язання рівняння несталої планової фільтрації за явно-неявною схемою, коли є дотримання потокового балансу по всій області моделі.

6. Результати досліджень 2-го розділу дозволяють використати комп'ютерно-інтегровані технології для моделювання фільтраційних збурень, які спричиняють практично рівномірне переміщення центральних і периферійних точок з об'ємом мульди зсуву, рівним об'єму водовмісного піщаного матеріалу, та формують нове фізичне уявлення водозахисних функцій масиву.

7. Результати досліджень за матеріалами другого розділу опубліковано у роботі [2].

РОЗДІЛ 3

ГІДРОБЕЗПЕКА ПІДРОБКИ РЕГІОНАЛЬНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ В ЗАХІДНОМУ ДОНБАСІ

3.1 Оцінка проникаючої здатності бучацьких пісків

Наявні розробки в оцінці водозахисних властивостей підроблюваної товщі гірських порід [83], [84] свідчать, що при обґрунтуванні та виборі критеріїв безпеки виймання вугілля під водними об'єктами ототожнюються умови прориву в гірничі виробки води і водонасичених пісків. Цілком очевидно, що, за інших рівних умов, наслідки некерованого водопрпливу в гірничі виробки менш небезпечні, ніж прорив водопіщаної суміші. Водночас водовіддача на контурі водопровідних тріщин і водовмісної порожнини завжди буде вищою, ніж із пористого колектора, що має фільтраційний опір.

Якщо взяти до уваги висновки НІМІ про те, що небезпечні водопрпливи в гірничі виробки формуються в разі зниження водозахисної товщі порід на 35 – 50 % щодо висоти зони водопровідних тріщин, то правомірним є пошук резерву захисних властивостей гірських порід за умовами проникаючої здатності водопіщаної суміші.

Наведені міркування, за позитивного розв'язання задачі, взагалі унеможливають оцінку аналогічного резерву власне водозахисних властивостей підроблюваної товщі, оскільки він буде завідомо вищим за встановлений НІМІ.

Сформульовану задачу розв'язано шляхом зіставлення відомих натурних і експериментальних даних про коефіцієнт проникності підробленої товщі із залежностями, що пов'язують проникність і розкриття тріщин у контурі, обмеженому умовою утворення зворотних фільтрувальних зон для бучацьких пісків.

Із практики експлуатації водозабірних споруд добре відомо, що навколо сітчастого або щілинного фільтра утворюється захисна зона (зворотний

фільтр), з якої вимиваються дрібні фракції зернистої водоносної породи, а більші прилягають до отворів або щілин, перешкоджаючи подальшому виносу матеріалу. Найнадійнішим параметром, що контролює ефект утворення зворотних фільтрувальних зон, вважається значення діаметра фракції d_{50} у зерновому складі водоносних порід. Розмір d_{50} показує діаметр, менше якого в пробі міститься 50% фракцій. Розкриття фільтрувальних щілин, що дорівнює $1,5 d_{50}$, забезпечує утворення зворотної фільтрувальної зони для співвідношення $d_{50} / d_{10} > 2$ [2].

Для визначення розкриття водопровідних тріщин, контур яких збігся б з умовою утворення зворотної фільтрувальної зони, виконано статистичний аналіз фракційного складу бучацьких пісків, які були випробувані Павлоградською геологорозвідувальною експедицією в різні періоди розвідки шахтних полів Західного Донбасу, починаючи з 1967 року. Обсяг статистичної інформації містив дані гранулометричного аналізу за 246 пробами. Відомості про розподіл фракцій зведено в табл. 3.1.

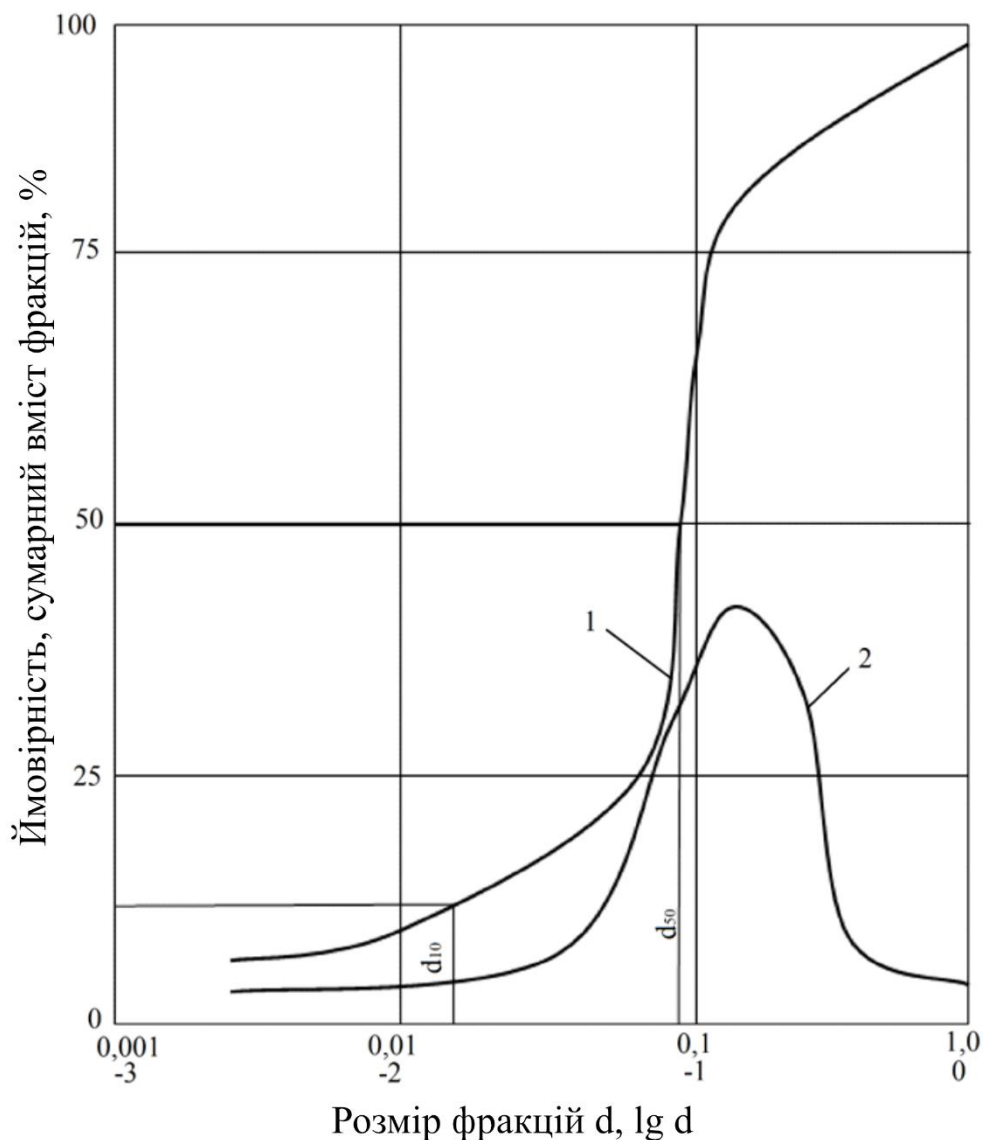
Таблиця 3.1 – Розподіл фракцій при масовому випробуванні бучацьких пісків

Вміст фракцій	Розмір фракцій, мм								
	0,005	0,005-0,01	0,01-0,05	0,05-0,1	0,1-0,25	0,25-0,5	0,5-1,0	1,0-2,0	2,0
середнє, %	3,5	3,7	4,2	29,0	43,3	8,1	5,4	3,3	0,5
за сукупністю, %	3,5	7,2	11,4	40,4	82,7	90,8	96,8	99,5	100,0

Для отримання статистично надійної величини значень було побудовано по кожній із проб інтегральні графіки, аналогічно наведеним на рис. 3.1.

Рис. 3.1 ілюструє результати усереднення та ймовірнісної оцінки фракційних аналізів бучацького водоносного горизонту.

За частковими значеннями d_{50} , які знімають безпосередньо з графіків, розраховано математичне очікування та середньоквадратичне відхилення, які становили відповідно 0,093 мм і 0,008 мм.



1 – сумарний вміст фракцій; 2 – розподіл ймовірності розмірів фракцій

Рисунок 3.1 – Графіки розподілу ймовірності та сумарного вмісту фракцій бучацького піску

Тобто, за високого рівня довірчої ймовірності 0,95, значення d_{50} не буде меншим за 0,077 мм. Отже, наближення контуру гірських порід з розкриттям водопровідних тріщин $1,5 d_{50}$, рівне 0,115 мм для бучацького водоносного

горизонту, гарантує утворення зворотної фільтрувальної зони (з рис. 3.1 нескладно побачити, що при цьому задовольняється вимога $d_{50} / d_{10} > 2$).

До теперішнього часу відсутні систематизовані достовірні відомості про абсолютні величини розкриття тріщин у гірських породах, що підробляються. Це пояснюється складною динамікою тріщиноутворення і неможливістю прямого інструментального або візуального огляду тріщинуватої зони без її додаткового зрушення, що спотворює реальну картину. Єдиним інформаційним параметром про проникність тріщинуватої зони є величина коефіцієнта проникності (або коефіцієнта фільтрації). У роботі [71] надано теоретичне обґрунтування методики експериментального оцінювання проникності гірських порід, що підробляються, за результатами дослідних наливів і нагнітань у свердловини. Причому слід особливо відзначити розроблені прийоми, які забезпечують коректність розрахунків при розшаруванні гірських порід, що зумовлює водопоглинання масиву, але в сумарному вигляді мало інформує про водопропускну здатність нормально-зосереджених тріщин. Методика апробована в натурних умовах і, за достатньої узгодженості результатів, розширена в більшому діапазоні параметрів на моделях з еквівалентних матеріалів.

На рис. 3.2 на підтвердження сказаного, а також для подальших викладок і розрахунків, наведено експериментальні дані, отримані ВНІМІ.

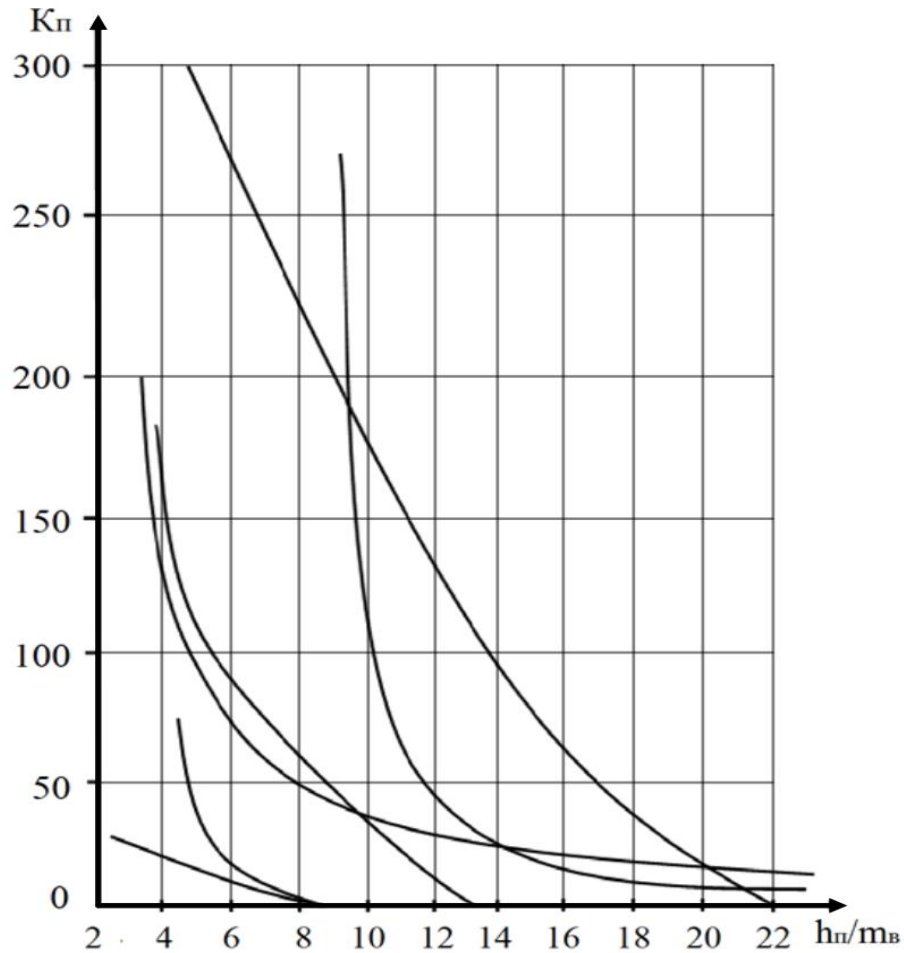
Графіки логарифмічно лінеаризуються, що дуже характерно для багатьох гідродинамічних залежностей. Їх подання в координатах «кратність підробки – коефіцієнт проникності» дає змогу пов'язати інтенсивність зміни проникності з інтенсивністю розкриття тріщин і кратністю підробки.

Відомо, що коефіцієнт проникності тріщинуватої середовища пропорційний квадрату ширини розкриття тріщин. Зазначимо, що оцінка проникності зони водопровідних тріщин за їх розкриттям дає завищені результати через контролюючий вплив менших тріщин.

Очевидно, що цей висновок слід вважати додатковим аргументом на користь обережності наших оцінок, як і те, що інтенсивність зміни проникності за розкриттям тріщин прийнято за квадратичним законом

$$i_k = \frac{K_{П2}}{K_{П1}} = \frac{S_{T2}^2}{S_{T1}^2}, \quad (3.1)$$

де i_k – інтенсивність збільшення проникності від K_{n1} до K_{n2} у разі збільшення розкриття тріщин від S_{T1} до S_{T2} .



K_n – коефіцієнт проникності товщі, дарсі; h_n – потужність підроблюваної товщі, м; $m_{в}$ – виймана потужність пласта, м

Рисунок 3.2 – Залежність проникності підробленої товщі від параметрів підробки (за НІМІ)

Зазначимо, що у співвідношенні (3.1) щодо значення i_k не взяті до уваги параметри, що визначають густину тріщин, оскільки їх чисельні значення однакові в одному й тому розглянутому об'ємі масиву гірських порід, а саме

це має місце в нашій задачі. Її первісна постановка тепер конкретизується необхідністю встановлення на графіках (див. рис. 3.2) інтервалу кратності підробки $\Delta(h_{II} / m_e)$, який би відповідав інтенсивності збільшення проникності i_k у діапазоні між верхнім контуром зони водопровідних тріщин та контуром, який обмежує утворення зворотних фільтрувальних зон, де S_{T2} дорівнює 0,115 мм.

За даними спеціально проведених експериментів [71], що збігаються з візуальними вимірами, на верхньому контурі зони водопровідних тріщин їх розкриття має величину 0,03 – 0,05 мм. Надаючи останнім даним значення S_{T1} , за формулою (3.1) маємо $i_k = 5,2 - 16,6$. За максимальної обережності розрахунків слід прийняти $i_k = 5,2$. Тоді, на найкрутіших ділянках графіків (див. рис. 3.2), починаючи з кратності підробки 12 – 13, для задоволення рівності $i_k = 5,2$, потрібен діапазон кратності, що становить щонайменше 3,0.

Вочевидь, це буде шуканий резерв, який має місце у встановленні критеріїв безпеки за ототожнення водного об'єкта, як деякого резервуара води, з водоносним горизонтом, представленим бучацьким піском.

Дослідження гранулометричного складу бучацьких пісків становить і самостійний інтерес для діагностики випадків проникнення піщаного матеріалу в очисні вибої. За наявності потужного шару пухких пісковиків у підроблюваному міжпласті це важливо з погляду однозначності в оцінці безпеки гірничо-геологічної ситуації. Наприклад, гранулометричні та петрографічні дослідження матеріалу, винесеного водою з покрівлі в очисний вибій 801-ї лави шахти «Тернівська», однозначно засвідчили його приналежність до зони вивітрювання, а не пісків бучацького горизонту. Із табл. 3.2 видно, що домінантні фракції бучацького піску і дослідженого матеріалу явно не збігаються.

Таблиця 3.2 – Результати порівняльного фракційного аналізу

Приналежність проб	Вміст фракцій, %	Розмір фракцій, мм						
		0,1	0,1 – 0,25	0,25 – 0,5	0,5 – 1,0	1,0 – 2,0	2,0 – 5,0	>5,0
Бучацький пісок	середнє	40,4	42,3	8,1	5,4	3,3	0,5	–
	за сукупністю	40,4	82,7	90,8	96,2	99,5	100,0	–
Піщаний матеріал із 801-ї лави	середнє	8,7	31,5	36,5	9,7	9,2	3,4	1,0
	за сукупністю	8,7	40,2	76,7	86,4	95,6	99,0	100,0

3.2 Дослідження механізму формування прориву водопіщаної суміші в гірничі виробки

3.2.1 Моделювання напружено-деформованого стану попередньо розшарованої водозахисної товщі

Факторами, що заслуговують на увагу та додаткову оцінку, є попереднє розшарування водозахисної товщі гірських порід покрівлі при вийманні вугільного пласта і вплив на неї технологічних параметрів очисних робіт.

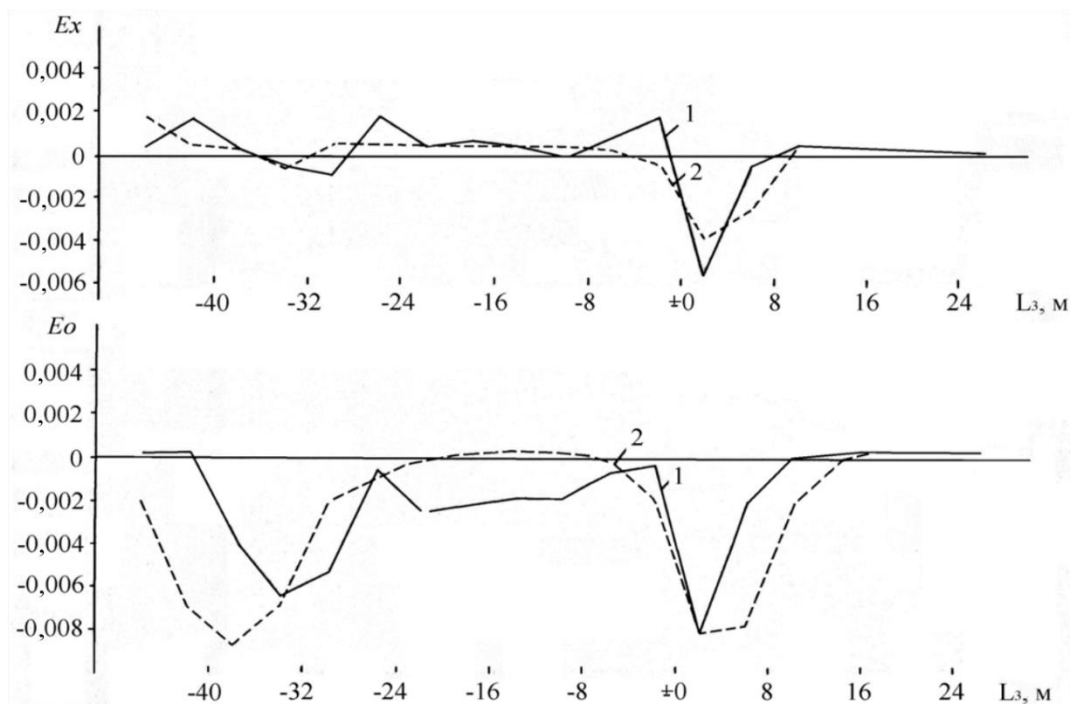
Для умов Західного Донбасу інженером І.М. Нікітіною накопичено і систематизовано документальні відомості щодо 500 вивалів гірських порід із покрівлі очисних і підготовчих виробок. Нами проведено геологічну типізацію окремоностей міжшарових контактів.

Заміри площі відриву та об'єму вивалів дають змогу оцінити міцність на розрив міжшарових контактів. Відомості про це наведено в табл. 3.3.

Згідно обґрунтувань наданих у п.р. 2.2 була побудована геомеханічна чисельна модель шаруватої вугільної товщі, що підробляється [73]. Результати модельних імітаційних розрахунків ілюструють рис. 3.3 – 3.4.

Таблиця 3.3 – Типізація пошарових поверхонь ослаблення в породах нижнього карбону Західного Донбасу

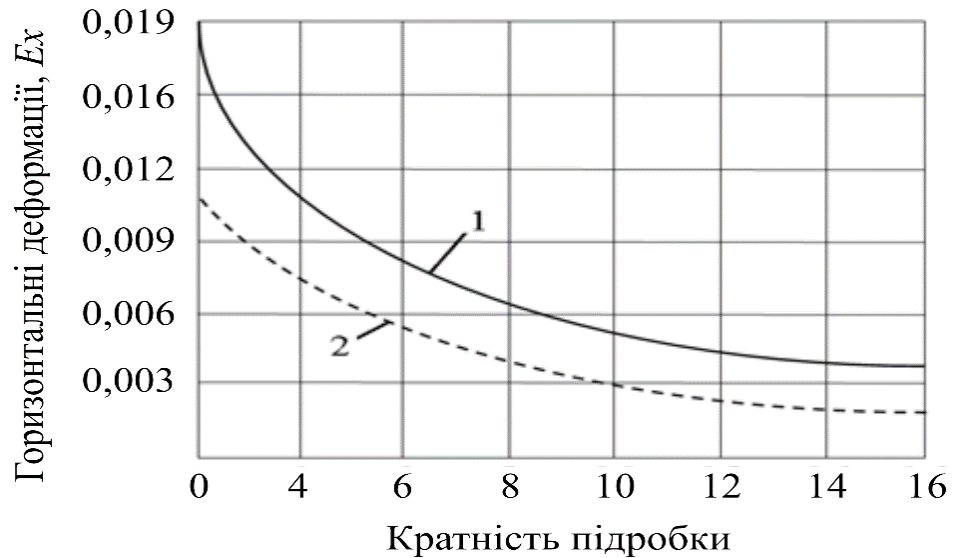
Поверхня ослаблення	Вмісні гірські породи	Межа міцності на розрив, Па·10 ⁻⁵
Площини ковзання тектонічного походження	аргіліти алевроліти пісковики	0,01 – 0,25 0,15 – 1,80 0,76 – 2,30
Контакти вугільних пластів із бічними породами	вугілля – аргіліт вугілля – алевроліт вугілля – пісковик	0,08 – 0,82 0,15 – 1,20 0,60 – 6,50
Глинистовуглистый матеріал	алевроліти пісковики	1,50 – 2,50 3,20 – 5,50
Рослинний детрит	аргіліти алевроліти пісковики	1,60 – 3,50 3,20 – 5,50 3,00 – 17,00
Контакти між літологічними типами порід	пісковик – аргіліт пісковик – алевроліт аргіліт – алевроліт	5,00 – 8,50 6,00 – 12,00 8,00 – 16,00



E_x і E_o – відповідно горизонтальні та сумарні деформації;

L_z – відстань до лінії очисного вибою

Рисунок 3.3 – Згладжування відносних горизонтальних деформацій у шарі алевроліту за природної міцності по контакту покрівлі та підшви (1) і після попереднього розшарування (2)



1, 2 – відповідно до і після попереднього розшарування

Рисунок 3.4 – Зіставлення горизонтальних деформацій розтягання в шаруватому масиві

Чітко простежується згладжування горизонтальних напружень і деформацій у розшарованому масиві щодо нерозшарованого. Зниження деформацій, що формують нормально зосереджені водопровідні тріщини, сягає 40 % у шарах, відпрацьованих кратно 10 – 16 вийманим потужностям (рис. 3.4).

Важливо, що і верхній шар, який контактує з бучацьким водоносним горизонтом, реагує на розшарування нижніх у вигляді зниження розтягальних горизонтальних деформацій в межах 10 – 25%.

На рис. 3.5 наведено графіки залежності максимальних значень розтягальних горизонтальних деформацій від довжини очисного вибою (лави). Видно, що різка інтенсифікація деформацій модельованої товщі відбувається при збільшенні довжини лави від 60 м до 80 м. За розмірів лави понад 77 м досягнутий рівень горизонтальних деформацій і вертикальної проникності шарів практично не змінюються.

Чисельні значення деформацій розшарованої товщі зіставлені з аналогічними характеристиками цієї ж товщі, на контурі якої в площині контакту

«карбон-бучак» відбулась, підкріплена практикою, умова кратності підробки ($15m_6 + 3$ м).

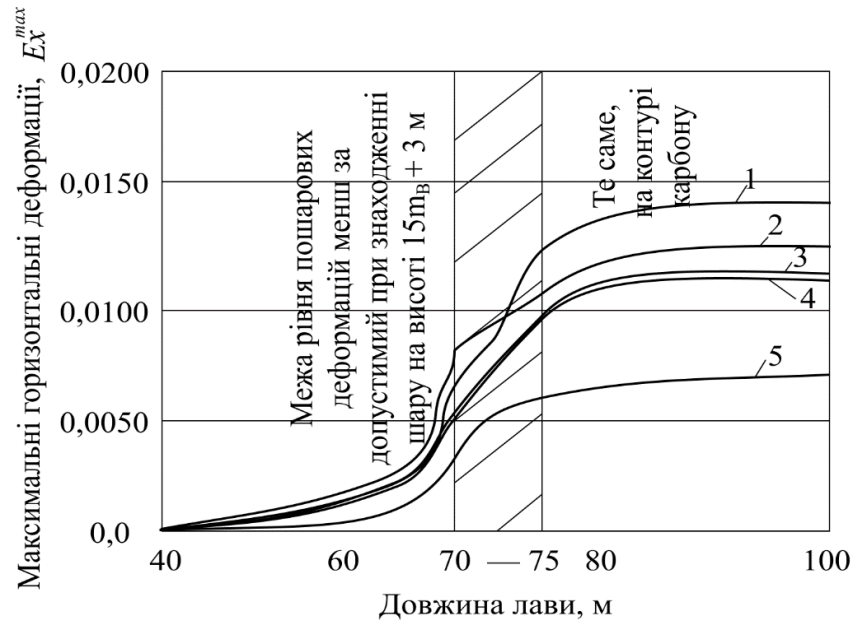
Отримані у такий спосіб значення горизонтальних деформацій виокремлюють на графіках, наведених на рис. 3.5, зону з рівнем деформацій (і проникності), що не виходять за межі значень, отриманих за умови кратності підробки « $15m_6 + 3$ м».

Крім цього, на чисельних геомеханічних моделях досліджено ситуації, що ускладнюють ведення очисних робіт: зупинка лави і вивал порід із покрівлі на висоту до 9,3 м поблизу сполучення лави з виїмковим штреком.

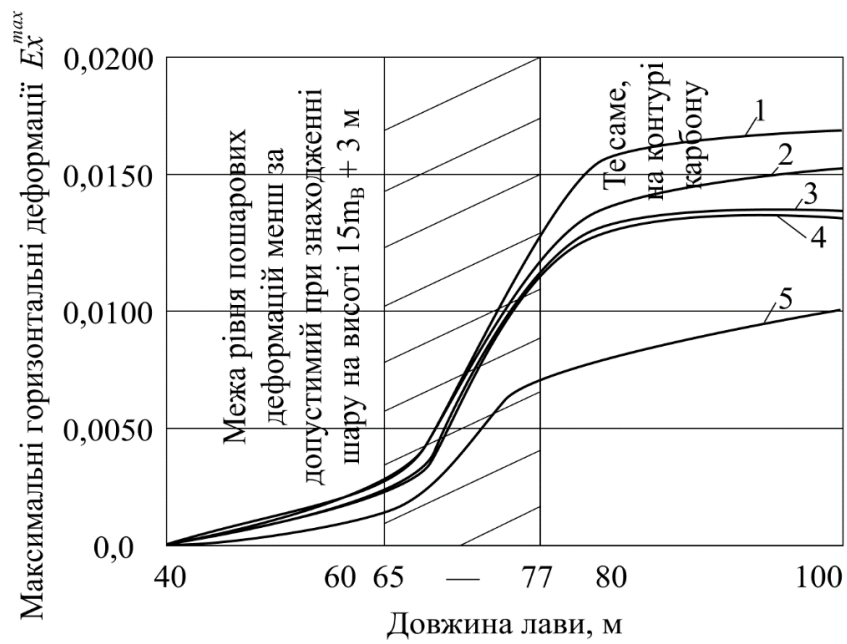
Під час зупинки лави зона проникності в шарі, що підстилає пісковик, зміщується в бік виїмкового штреку. Одночасно в нижніх шарах проникність зростає в 2 – 3 рази в 12-метровій зоні лави, прилеглої до штреку. Під час вивалу, у породах, що залягають над його куполом, проникність знижується, але тріщинні розрихлення поширюються вздовж лави в обидва боки від вивалу.

У всіх варіантах моделювання в шарах із підробкою 10 кратностей і більше не виникає деформацій, які можна порівняти з критичним рівнем, достатнім для прориву водопіщаної бучацької суміші.

Моделюванням встановлено також, що позитивний гравітаційний ефект під час відпрацювання пласта за падінням проявляється в зниженні проникності порід на 8 – 10% (відносно відпрацювання за підняттям), проте його використання можливе за відсутності стійких обводнених прошарків у покрівлі [2].



а



б

а – після попереднього розшарування; б – до розшарування;

1 – 5 – номери шарів зверху вниз

Рисунок 3.5 – Графіки залежності максимальних горизонтальних деформацій розтягання товщі в покрівлі шарів від довжини лави

3.2.2 Експериментальні дослідження захисних властивостей гірських порід

Попередні дослідження захисних властивостей гірських порід під бучацьким водоносним горизонтом виявили значний резерв, зумовлений загасанням розривних деформацій у породній товщі, а також новим підходом до оцінювання небезпеки прориву бучацьких пісків, який розкрив характер їх взаємодії з пошарово ослабленим породним масивом.

Проте слід вважати виправданим обережний підхід до промислової апробації наукових результатів, що визначають рівень безпеки гірничих робіт, який склався. Такий підхід містить, як правило, експериментальне підтвердження отриманих даних.

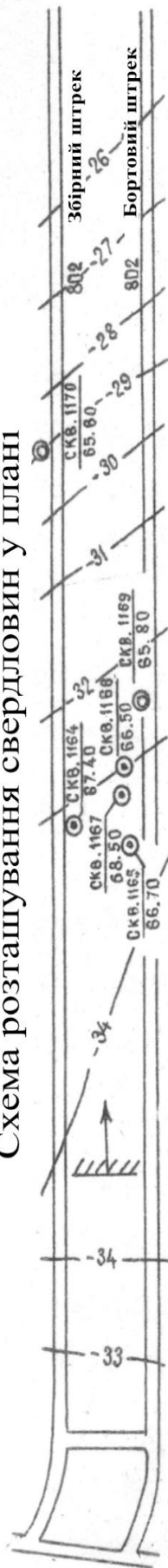
Під час планування технологічних і конструктивних елементів експериментальних робіт було взято до уваги досвід аналогічних досліджень, які виправдали своє призначення практикою гірничих робіт у Західному Донбасі. Крім цього, нами було передбачено декілька особливостей, які враховують виявлені відмінності в критеріальній оцінці умов підробки бучацького водоносного горизонту.

Експериментальні спостереження за поглинанням водопіщаної суміші в товщі підроблюваних гірських порід, що відпрацьовуються, проведено в натурних умовах 802-ї лави шахти «Тернівська». Лавою відпрацьовувався вугільний пласт C_8 механізованим комплексом 1 МКМ [2].

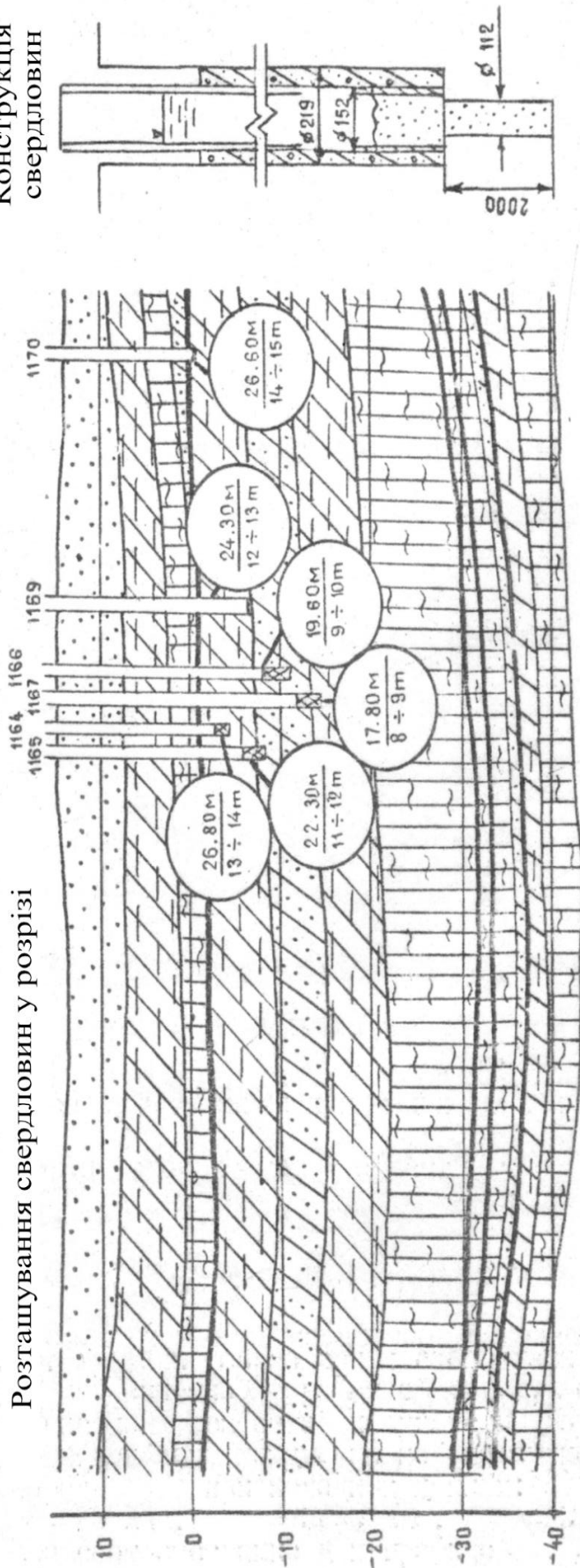
Одночасно з підготовкою виїмкового стовпа на поверхні було обладнано спостережні свердловини, пробурені Павлоградською ГРЕ ПГВ «Укрпівден-геологія». Розміщення свердловин та їх конструкція ілюструється рис. 3.6.

На рис. 3.6 крім позначень, зазначених у підрисункових написах, наведено відомості у вигляді «дробу»: у чисельнику – відстань від вибою свердловини до покрівлі пласта C_8 , м; у знаменнику – те саме, кратно вийманій потужності. Біля устя свердловин на рис. 3.6 наведено їх номери (чисельник) та абсолютні відмітки в метрах (знаменник).

Схема розташування свердловин у плані



Розташування свердловин у розрізі



- пісок; — алевроліт; — аргіліт; — пісковик; — вугілля;
- експериментальна свердловина; — п'єзометрична свердловина;
- ізоляційні абсолютних відміток підшви вугільного пласта С₈

Рисунок 3.6 – Схема розташування експериментальних свердловин та їхня конструкція

Розміщення устя свердловин у плані вибрано з таким розрахунком, щоб максимально наблизитися до зони впливу виїмкових штреків, де відмічається зростання зони тріщин у гірських породах, які підробляються.

Конструкція свердловин передбачала затрубну цементацію на ділянках їх заглиблення в карбоніві відкладення.

У затрубному просторі вище подошви бучацького водоносного горизонту залишено щільний глинистий розчин, який виконував роль змащення і, природно, зменшував можливі збурення у привибійній частині свердловин, які більш інтенсивно зсуваються відносно жорстко затиснутого стовбура.

Двометрову, не обсажену ділянку стовбура свердловин вище вибою розбурювали після встановлення і цементування обсадної колони. Далі проводили ретельне очищення і промивання свердловин.

Свердловини були наповнені на висоту 4 – 12 м від вибою бучацьким піском і водою з таким розрахунком, щоб гідростатичний тиск стовпа води відповідав вимірному під час буріння напору щодо подошви бучацького водоносного горизонту.

Свердловину № 1169 було залишено для стеження за п'єзометричним рівнем у водоносному пісковикі, № 1170 – у вугільному прошарку.

З метою отримання бучацького піску над 802-ю лавою було пробурено й обладнано спеціальну піскозабірну свердловину, заглиблену обсадною трубою в бучацький горизонт.

За допомогою ерліфтної колони і компресора ДК-9 на поверхню було витягнуто близько трьох кубометрів бучацького піску, який використовували для наповнення експериментальних свердловин.

Таким чином, досягалась гідродинамічна аналогія між подошвою бучацького водоносного горизонту та спостережними свердловинами, вибої яких віддалені від покрівлі вугільного шару S_8 , який відпрацьовують, у межах 17,8 – 26,8 м або 8 – 13 кратностей вийманої потужності. Остання становила не менше 1,75 м.

Спостереження полягали у вимірюванні рівнів води і піску в свердловинах у міру наближення лінії очисного вибою, його проходу під свердловиною і віддалення на відстань до 50 м. Інтервали часу між вимірами коливалися в межах 3 – 12 годин зі згущенням у 10-метровій зоні найактивнішої дії очисного вибою. Одночасно здійснювалося візуальне обстеження робочого простору лави з фіксацією водопроявів.

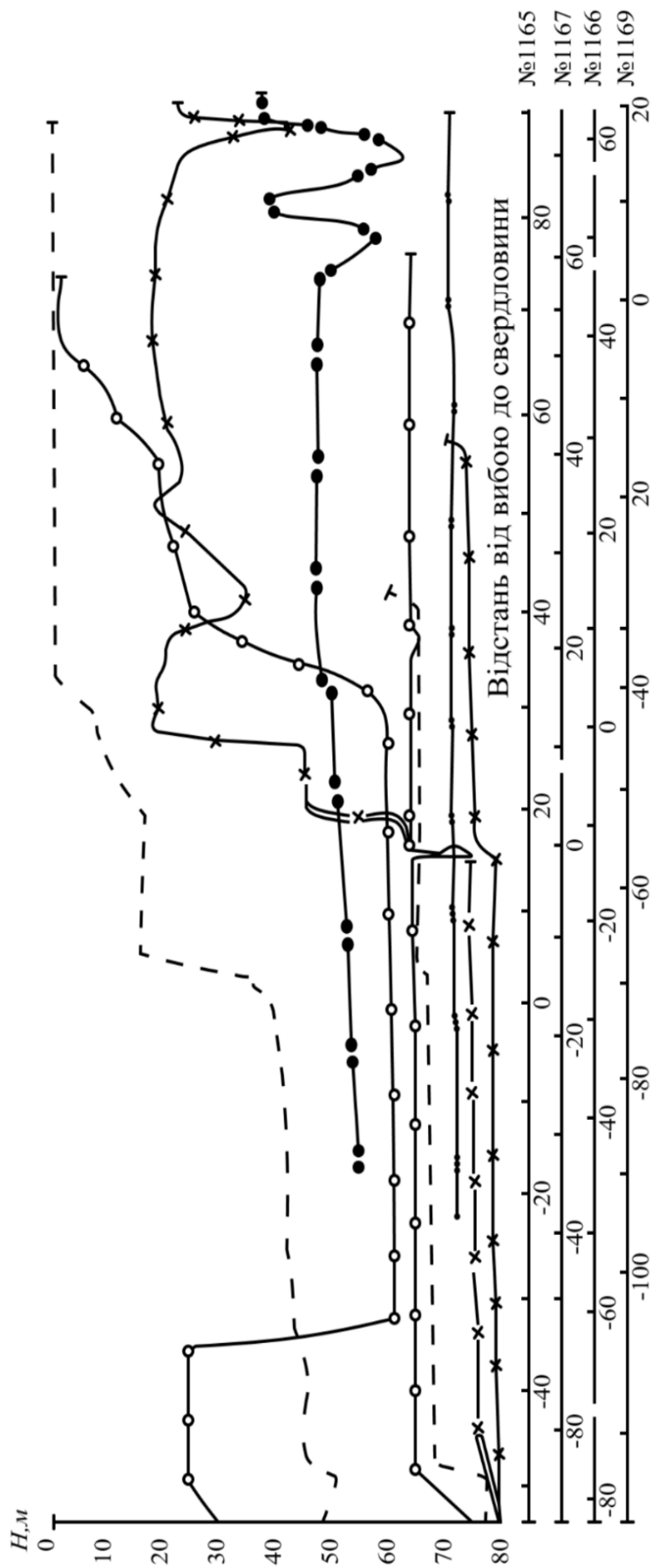
Результати виробничих вимірювань зображено на рис. 3.7, де видно, що положення рівнів піску в усіх свердловинах не змінилося навіть за явно вираженого водопоглинання в інтервалі, кратному 8 – 9 вийманим потужностям (свердловина №1167). Це свідчить про те, що тріщини, які відкрилися, були недостатніми для руху бучацького піску під дією гідродинамічного тиску води, що фільтрується.

Рівні води у свердловинах №1165 – 1167, 1169, після їх підробки, помітно підвищилися за рахунок тріщинного розпушення водотривких аргілітів в основі водоносного пісковика. У свердловині №1165 рівень стійко стабілізувався, отже, п'єзометричний тиск відновився в шарах пісковика, віддалених на відстань 11 – 12 кратностей від покрівлі вугільного пласта (детальна геологічна документація кернових проб засвідчила наявність мало-потужних водотривких прошарків у пісковиках). Ці дані слід розглядати як доказ відсутності нормально-січних водопровідних тріщин у масиві гірських порід, розташованих вище за II кратностей вийманої потужності пласта.

Не суперечить цьому і рівневий режим у свердловині №1169, де за характерними спадами, після входу в зону підробки, відмічається подальший підйом рівня.

Практично було відсутнє коливання п'єзометричного рівня у свердловині №1170 через її розташування в крайовій частині зони опорного тиску.

У свердловині №1164, перед її входом у зону зсуву над очисним вибоєм, різко підвищився рівень води, потім практично збігся з п'єзометричним напором у мезокайнозойській товщі водоносних порід і надалі залишився без змін. Цілком ймовірно, це пов'язано з розгерметизацією обсадних труб.



- свердловина №1165; – свердловина №1167;
 – свердловина №1166; – свердловина №1169;
 – штучна зміна рівневих поверхонь піску або води у свердловинах;
 – вибір п'єзометричної свердловини №1169

Рисунок 3.7 – Зміна глибини рівнів води та піску в експериментальних свердловинах під час їхньої підробки

В очисних вибоях під експериментальними свердловинами водопроярів не спостерігалось. Капіж й окремі струминні виділення води фіксувалися на кінцевих ділянках лави після реалізації циклів вторинних осадок покрівлі.

Останнім передувала помітна активізація гірського тиску у вигляді підвищеного обтиснення гідравлічних стояків кріплення, інтенсивного відшарування та вивалів «несправжньої» покрівлі. Ці дані підтверджують, що зоною водопровідного тріщиноутворення розкривався водоносний пісковик.

3.2.3 Розрахунковий метод визначення розкриття тріщин розшарування в експериментальних свердловинах над гірничими виробками

Інформативність вимірів поглинання води у свердловинах, пробурених над пластом вугілля, що відпрацьовується, можна значно підвищити, розв'язуючи задачу про розкриття тріщин розшарування в гірській породі. Розрахункову схему наведено на рис. 3.8 [2].

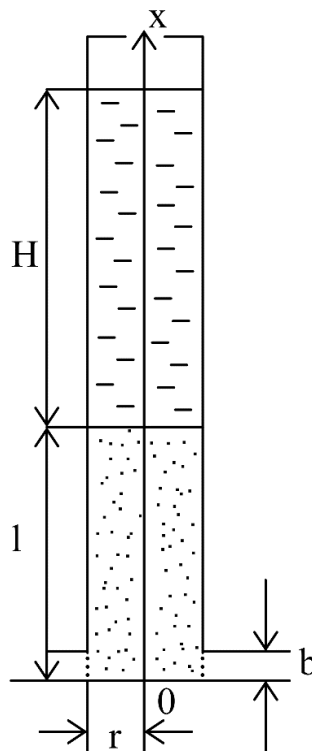


Рисунок 3.8 – Схема граничних умов розв'язання задачі про розкриття тріщин розшарування

Фільтрація води з розкритої тріщини, завширшки b через стовп піску заввишки l , за початкового напору води H буде практично одновимірною (нижче враховано осесиметричне розтікання навколо тріщини). Тому поточне за координатами x, t значення напору h визначається рівнянням

$$a^* \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (3.2)$$

де a^* – коефіцієнт п'єзопровідності піску.

Використовуючи загальний розв'язок диференціального рівняння (3.2), відомий з функціонально заданих напорів (потенціалів) з умовами

$$\left. \begin{aligned} h|_{x=0} &= \Psi(t), & h|_{x=l} &= f(t) \\ h|_{t=0} &= \varphi(x) \end{aligned} \right\}, \quad (3.3)$$

запишемо послідовно два співвідношення, що задовольняють двом фазам фільтрації – 1) початковій, коли фільтруються пружноємні запаси зі стовпа l водонасиченого піску (фаза запізнення, за якої фільтраційне збурення не змінює величини H); 2) фазі фіксованого вимірами зниження напору на межі $x = l$, яке фіксують виміри

$$h_i(x, t) = \Psi_1(t) + [f_1(t) - \Psi_1(t)] \frac{x}{e} - \sum_{n=1}^{\infty} T(t_3) \sin \frac{n\pi x}{l}, \quad (3.4)$$

$$h_2(x, t) = \Psi_2(t) + [f_2(t) - \Psi_2(t)] \frac{x}{e} - \sum_{n=1}^{\infty} T(t_i) \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (3.5)$$

Тут для часу запізнювання t_3 і часу t_i , що відповідає i -му виміру зниженого напору, можна отримати

$$T(t_3) = e^{-\left(\frac{n\pi a}{e}\right)^2 t_3} \left\{ G + \frac{2n\pi a^2}{l^2} \int_0^{t_3} e^{\left(\frac{n\pi a}{e}\right)^2 \tau} [\Psi_1(\tau) - (-1)^n f_1(\tau)] d\tau \right\}, \quad (3.6)$$

$$T(t_i) = e^{-\left(\frac{n\pi a}{e}\right)^2 t_i} \left\{ G + \frac{2n\pi a^2}{l^2} \int_0^{t_i} e^{\left(\frac{n\pi a}{e}\right)^2 \tau} [\Psi_2(\tau) - (-1)^n f_2(\tau)] d\tau \right\}, \quad (3.7)$$

$$G = \frac{2}{l} \int_0^l \varphi(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx, \quad (3.8)$$

де $a = \sqrt{a^*} \tau$ – поточне значення часу.

Очевидно, що розв'язок для співвідношень (3.4) – (3.8) у замкнутому вигляді вимагає визначення явних значень функцій $\Psi(t), f(t), \varphi(x)$. Останні матимуть сенс для поставленої нами задачі, якщо розкриття тріщини b (рис. 3.8) утворює залежності, що містять контрольовані вимірами параметри.

Для врахування переходу одновимірного потоку по стовбуру свердловини в осесиметричне розтікання в тріщині, знайдемо одновимірний аналог напору виразом, що впливає з лінійного закону фільтрації

$$\Psi_1(t) = h_3 = \frac{V}{2\pi K_\phi b t_3}, \quad (3.9)$$

де V – пружноємні запаси води у водонасиченому піску;

K_ϕ – коефіцієнт фільтрації піску.

Вираз (3.9) справедливий за очевидного нехтування малою проникністю піску порівняно з проникністю тріщини.

З іншого боку, добре відомо

$$\frac{dV}{dh} = \pi r^2 \eta^* l, \quad (3.10)$$

що після інтегрування дає

$$V = (H - h_3) \pi r^2 \eta^* l, \quad (3.11)$$

де η^* – коефіцієнт пружності гірської породи.

З порівняння формул (3.9) і (3.11) маємо

$$\Psi_1(t) = h_3 = \frac{H r^2 \eta^* l}{r^2 \eta^* l + 2K_\phi b t_3}. \quad (3.12)$$

Нескладно помітити, що для фази запізнювання інші граничні умови необхідно прийняти у вигляді

$$f_1(t) = H, \quad \varphi_1(x) = H + l - x. \quad (3.13)$$

Після інтегрування рівнянь (3.6) і (3.8) за граничних умов (3.12), (3.13), а також виконавши необхідні перетворення, отримаємо

$$T(t_3) = e^{-\lambda t_3} G_1 + e^{-\lambda t} \frac{2n\pi\alpha^2}{l^2} H \left\{ \frac{\alpha}{\beta} e^{-\frac{\alpha\lambda}{\beta}} \left[\ln(\beta t_3 + \alpha) + \frac{\lambda}{\beta} (\beta t_3 + \alpha) + \left(\frac{\lambda}{\beta}\right)^2 \frac{(\beta t_3 + \alpha)^2}{2 \cdot 2!} + \left(\frac{\lambda}{\beta}\right)^m \frac{(\beta t_3 + \alpha)^m}{m \cdot m!} \right] - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\frac{\alpha\lambda}{\beta}} \left[\ln\alpha + \frac{\lambda\alpha}{\beta} + \left(\frac{\lambda}{\beta}\right)^2 \frac{\alpha^2}{2 \cdot 2!} + \dots + \left(\frac{\lambda}{\beta}\right)^m \frac{\alpha^m}{m \cdot m!} \right] - \frac{1}{\lambda} [(-1)^n (e^{\lambda t_3} - 1)] \right\}, \quad (3.14)$$

$$G_1 = \frac{2}{n\pi} [(1 - \cos n\pi)(H + l) + l \cos n\pi], \quad (3.15)$$

де $\lambda = \left(\frac{n\pi a}{l}\right)^2$, $\beta = 2K_\phi b$, $\alpha = r^2 \eta * l$, $n = 1, 2, 3 \dots n$, $m = 2, 3 \dots, m$.

Для другої фази фільтрації через тріщину з порівняння об'єму води, що контролюється за зниженням рівня у свердловині, та транзитного об'єму, який визначається проникністю бокової поверхні тріщини аналогічно співвідношенню (3.12), функція напору матиме вигляд

$$\Psi_2(t) = h(t_1) = \frac{r^2 (H - gt_i)}{K_\phi b t_i}, \quad (3.16)$$

де g – кутовий коефіцієнт на лінійній ділянці графіка зниження стовпа води у свердловині за час t_i . Для цього ж випадку

$$f_2(t) = H - gt_i, \quad \varphi_2(x) = h_i(x, t). \quad (3.17)$$

Інтегрування рівнянь (3.7), (3.8) за останніх умов дає змогу записати

$$T(t_i) = e^{-\lambda t_i} \left\langle G_2 + \frac{2n\pi a^2}{l^2} \left\{ \frac{r^2}{K_\phi b} \left[H(\ln t_i + \lambda t_i + \frac{(\lambda t_i)^2}{2 \cdot 2!} + \dots + \frac{(\lambda t_i)^m}{m \cdot m!} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - g t_i \right] - (-1)^n \left[H\left(\frac{e^{\lambda t_i}}{\lambda} - \frac{1}{\lambda}\right) - g\left(\frac{e^{\lambda t_i}}{\lambda^2}(\lambda t_i - 1) + \frac{1}{\lambda^2}\right) \right] \right\} \right\rangle, \quad (3.18)$$

$$G_2 = \left[\frac{Hl}{n\pi} (1 - \cos n\pi) - \sum_{n=1}^{\infty} T(t_3) \right]. \quad (3.19)$$

Для чисельної реалізації розв'язку рівнянь (3.12), (3.14), (3.16), (3.18) щодо невідомих t_3 і b є два шляхи. Перший полягає в покроковому наближенні до рівності

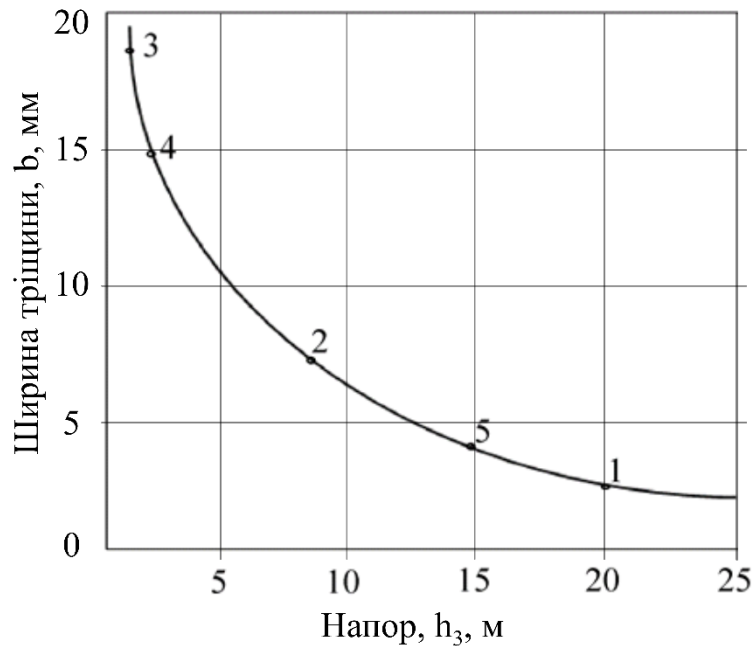
$$T(t_3) = 0, \quad (3.20)$$

справедливому для значень t_3 і b , що задовольняють із заданою точністю формулу (3.14) на межі $x \rightarrow l$ з тією ж точністю. Варіюючи параметрами, можна отримати графічну залежність $b = f(h_3)$, розраховану за співвідношенням (3.12). На графіку останньої (рис. 3.9), легко знайти загальні розв'язки із залежністю (3.16) для кожного з фіксованих значень t_i , що лінеаризують фактичний графік руху рівня води у свердловині.

Другий шлях більш трудомісткий, і полягає в знаходженні параметрів t_3 і b , що задовольняють рівнянням (3.4), (3.5) під час наближення із заданою точністю до межі $x = l$, де з тією самою точністю $h_2(x, t) \rightarrow H$, або $h_2(x, t) \rightarrow (H - g t_i)$ за $i > 1$.

Для зазначених алгоритмів розв'язання складено програми, які за виконання контрольних прикладів показали незначну похибку у відхиленні результатів (менше ніж 5%).

На рис. 3.9 наведено розрахунки розкриття тріщини розшарування.



1 – 5 – послідовність розрахованих значень розкриття тріщини, яка визначається перетином залежностей $b = f(h_3)$ і $b = f(h_4)$

при $a^* = 1,1 \text{ м}^2/\text{с}$; $K_\phi = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$; $r = 0,06 \text{ м}$; $\mathcal{L} = 10^{-5} \text{ м}^2$; $l = 9,5 \text{ м}$; $H = 50 \text{ м}$

Рисунок 3.9 – Зміна розкриття тріщини розшарування залежно від функції напору h_3

3.3 Механізм формування аномальних водоприпливів

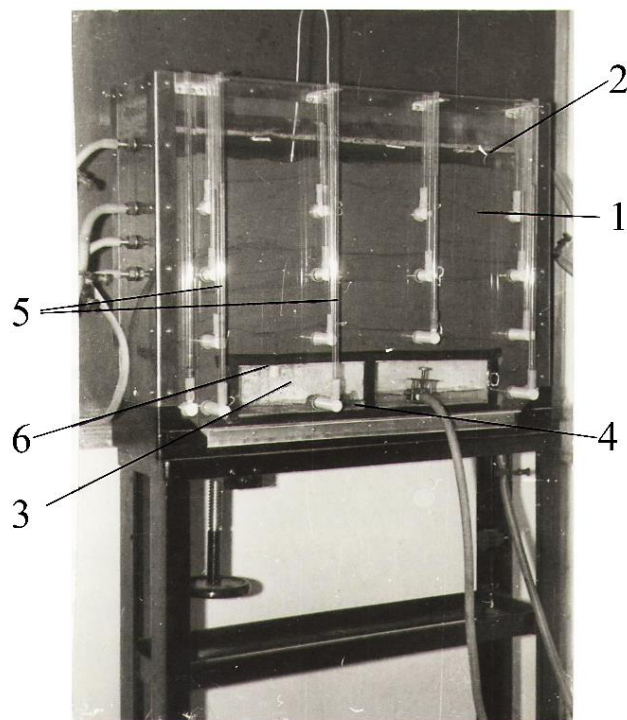
Формування аномально високого водоприпливу під час гідрогеомеханічного прориву покрівлі штреку досліджували на прикладі аварії у східному відкатному штреку пласта C_4^2 шахти ім. Сташкова. Під час технічної документації передаварійного стану виробки відмічено відсутність водоприпливу з покрівлі та помітне обтиснення й опускання її склепінчастої частини, що призвело до зім'яття бокових стояків із проривом води до $120 \text{ м}^3/\text{год}$, який згодом залишився практично без зміни [2].

У місці прориву було помічено стрибкоподібне зниження рівня в бучакському водоносному горизонті, зафіксоване в режимній гідрогеологічній свердловині. Величина припливу на такій обмеженій площі водовідбору

в Західному Донбасі зустрінуто вперше. Площина контакту літологічного заміщення порід наближається до штреку в межах 1,5 його радіусів, що з урахуванням початкового напору приблизно 80 м, безсумнівно, зумовило його гідрогеомеханічне руйнування.

Нескладні гідродинамічні розрахунки показують, що для формування такого припливу в основі бучацького горизонту неминуче має залягати сильнопроникний шар грубозернистого матеріалу. Непрямим підтвердженням цьому слугує і факт відсутності виносу бучацького піску у виробку. Останню обставину важливо мати на увазі, обґрунтовуючи ліквідаційні заходи.

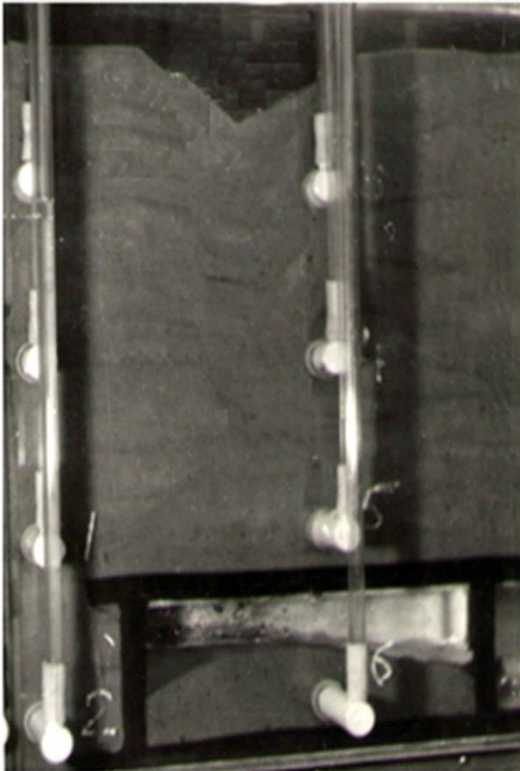
Пошук оптимального співвідношення дренажних пристроїв і дослідження процесу заповнення збійки проводили на фізичній моделі (рис. 3.10).



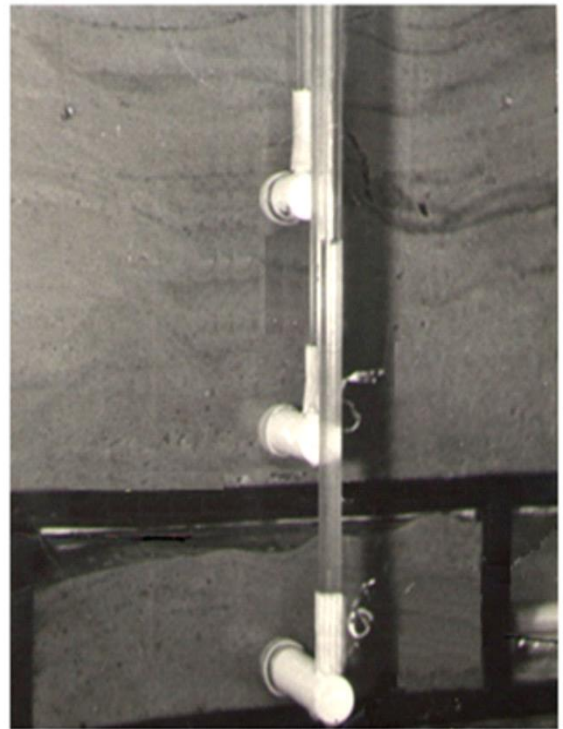
1 – водоносний горизонт; 2 – рівень води; 3 – виробка; 4 – дренажна труба; 5 – п'єзометри; 6 – зона прориву води через геомеханічно порушену зону

Рисунок 3.10 – Загальний вигляд фізичної моделі для дослідження гідрогеомеханічних процесів навколо виробок

На відміну від відомих модельних дослідів з вивчення прориву пливуну на еквівалентному матеріалі, де дотримано тільки геомеханічної подібності, геофільтраційне моделювання передбачало врахування взаємодії двофазної системи «вода-пісок». Нами вже було показано позитивні сторони такого моделювання. У випадку, що розглядається, дотримано автотельності витікання піску, а дренажні процеси над виробкою і поблизу перемички оцінюються варіантним зіставленням відносних змін параметрів. Рис. 3.11 і 3.12 ілюструють динаміку модельних напорів, припливів і фази заповнення тупика піском через свердловину у вигляді воронки.

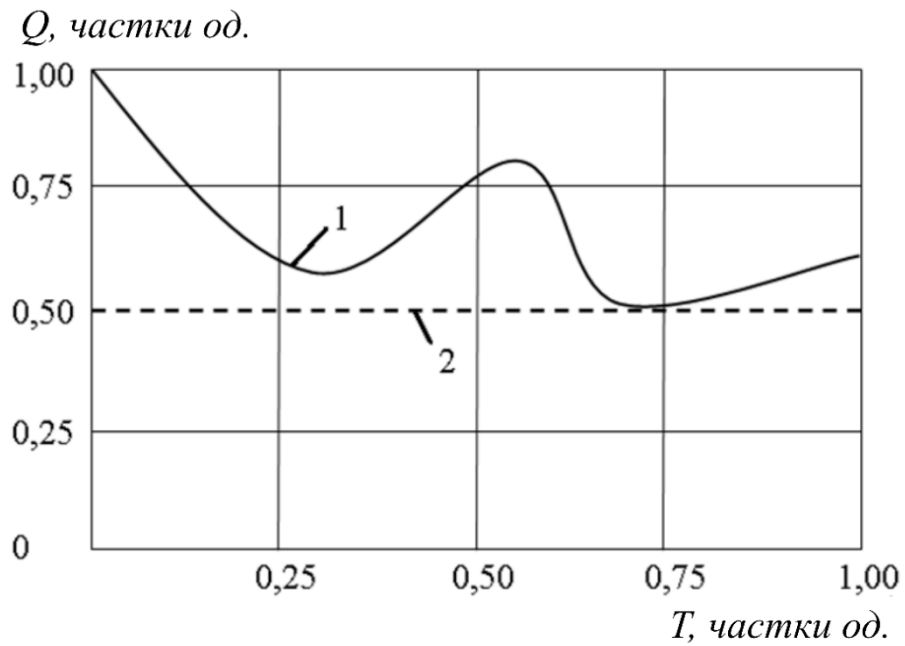


а

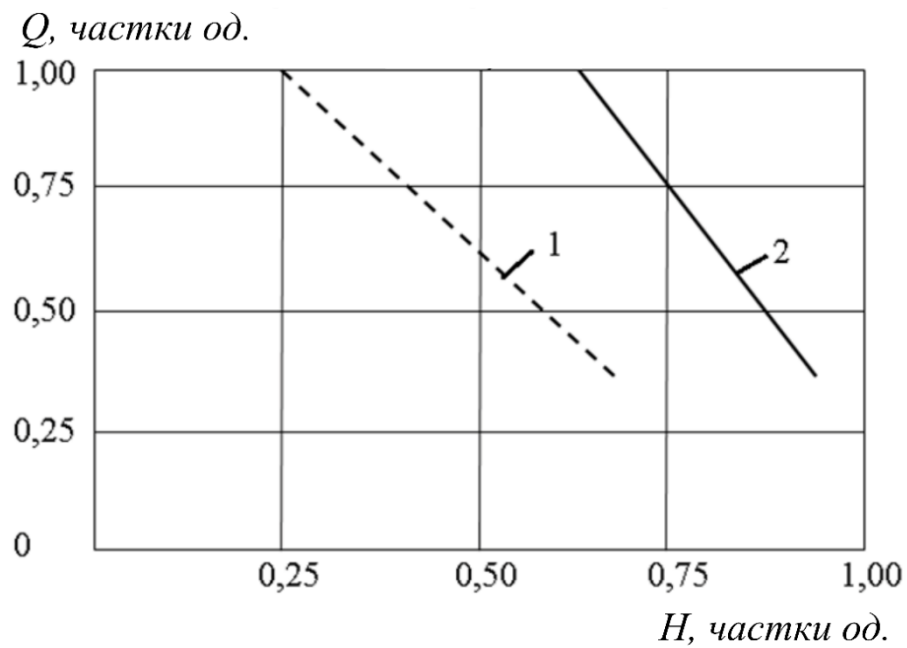


б

Рисунок 3.11 – Фази поступового заповнення глухого кута штреку бучацьким піском на моделі (див. загальний вигляд на рис. 3.10)



а



б

а – 1 – у фазі заповнення тупика, 2 – у разі вільного дренажу води зоною руйнування виробки; б – 1, 2 – відповідно, в заповненому тупику і над виробкою у фазі керованого водовідбору дренажною трубою

Рисунок 3.12 – Зміна модельних напорів H і припливів Q під час заповнення заперемиченого тупика бучацьким піском упродовж часу T (у частках від максимально зафіксованих параметрів H , Q , T)

Графіки показують, що стійкість перемичок збережеться за умови дренажного відбору майже 35% початкового припливу, водночас різко відновлюються напори в покрівлі виробки, тобто зберігається небезпека повторного гідрогеомеханічного руйнування суміжних виробок.

У зв'язку з цим найоптимальнішим є варіант збереження дренажного захисту, який дає змогу організувати зосереджений відбір води.

Висновки до розділу

Найбільш вагомим фактором гідрогеологічної структури Західного Донбасу є наявність регіонального водоносного горизонту над вугленосними карбонівими відкладами з напорами, що сягають 100 м. Це бучацький горизонт, який з кутовим неузгодженням формує покривну товщу шахтних полів і разом з тектонічними скидами визначає гідродинамічно відкриту фільтрацію води до вугільних шарів або її практичну відсутність. Більшість дослідників ототожнюють умови прориву води в гірничі виробки і водонасичених пісків. Вочевидь, це не так і, логічно, що критерії гідробезпеки виймання вугілля під бучакським горизонтом потребували більш ґрунтового фізичного тлумачення як до проникності піску, так і до формування водозахисних властивостей вуглевмісних гірських порід. Тому цей розділ дисертаційної роботи містить методику й оригінальні результати дослідницького напрямку, які дозволяють визначити послідовність використання сучасних програмних продуктів з гарантованою достовірністю оцінювання гідроекобезпеки гірничих робіт на різних етапах функціонування вугільних шахт Західного Донбасу.

При обґрунтуванні гідробезпеки регіонального водоносного горизонту в Західному Донбасі досягнуто такі результати:

1. Показано, що навколо розкритої тріщини у гірській породі утворюється захисна зона «зворотний фільтр», з якої вимиваються дрібні фракції піску, а крупні утворюють захисну зону за співвідношенням $d_{50} / d_{10} > 2$, де

d_{50} та d_{10} є діаметрами фракцій з відповідним вмістом у водоносному горизонті 50 % і 10 %, що дозволяє підвищити якість геофільтраційної моделі при використанні комп'ютерно-інтегрованих технологій.

2. За умов, коли доступ до вимірів розкриття тріщин відсутній, знайдено емпіріоаналітичне тлумачення логарифмічної лінеаризації залежності між проникністю подробленої товщі порід і кратністю подробки, що з урахуванням отриманих ймовірнісних показників зернового складу бучацького піску дозволило гарантовано виявити існуючий резерв захисних властивостей аргілітів та алевролітів у Західному Донбасі, який дорівнює 3,0.

3. Проведене геомеханічне моделювання водозахисних функцій горизонтально розшарованих порід за рахунок процесу зрушення над рухомим очисним вибоєм (або їх штучного утворення гідророзчленуванням через спеціальні свердловини), що в сукупності з результатами оригінального натурального вимірювання поглинання води через шар бучацького піску над очисним вибоєм, а також аналітичного рішення і розрахунку динаміки проникнення бучацького піску через тріщину в свердловині підтверджує висновки попереднього пункту.

4. Вищенаведені результати з дослідження водозахисних властивостей розшарованої товщі аргілітів та алевролітів дозволили поширити їх тлумачення і встановити механізм прориву водопіщаної суміші через покрівлю магістрального штреку, де формується міжшарова лінза накопичення води з її подальшим проривом у штрек та одночасним гальмуванням руху піску у воронці впливу з бучацького горизонту та конусі припливу до штреку.

5. Результати досліджень за матеріалами третього розділу опубліковано у роботі [2].

РОЗДІЛ 4

АНАЛІТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ І РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОБУДОВИ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ОБВОДНЕНОГО ШАХТНОГО ПОЛЯ

4.1 Обґрунтування методики прогнозування зрушень гірського масиву і земної поверхні у Західному Донбасі з використанням комп'ютерного моделювання

4.1.1 Загальні підходи до визначення параметрів зрушення гірського масиву і поверхні шляхом побудови комп'ютерних моделей

Враховуючи наступні розділи, слід виокремити фізичні уявлення про параметри зрушення порід при підземному вийманні вугільних пластів, що призводить до утворення значних за об'ємами і розмірами порожнин в земних надрах. Найбільш узагальнено це відбувається наступним чином. Гірські породи, які залягають над очисною виробкою, втрачають під собою опору, а породи, які лежать нижче, в свою чергу, звільняються від тиску [85] – [87]. В результаті порушується природна рівновага породного масиву навколо очисних виробок [74]. Даний процес називається зрушенням гірських порід.

Зрушення гірських порід є складним гірничо-геологічними процесом, що проявляється в різних формах:

- опускання шарів порід під дією власної ваги;
- осідання товщі порід в результаті стискання пластів під дією опорного тиску;
- зміщення порід за площинами нашарування;
- відрив і обвалення порід безпосередньої покрівлі пласта.

Весь цей комплекс форм характеризує зрушення і визначається низкою чинників. Найважливішими з них є [88]:

- фізико-механічні властивості гірських порід;

- структура гірських порід;
- кут залягання породних шарів;
- глибина розробки пластів;
- потужність пласта, що виймається;
- площа відпрацьованого простору і динаміка її формування;
- потужність покривних порід вугільної товщі;
- ступінь обводнення гірських порід і гідрогеологічна будова масиву.

Врахування взаємодії такої кількості чинників є складною логічною і математичною задачею, тому виникає необхідність розробки методики прогнозування динаміки означеного процесу шляхом комп'ютерного моделювання технології при вуглевидобутку і закритті вугільних шахт Західного Донбасу.

Методика основана на комплексному підході до виникнення гідроекологічних ризиків, яка обумовлена зрушенням гірських порід і його наслідками. Вона охоплює основні етапи аналізу і прогнозування ризиків, а також враховує особливості геологічної будови досліджуваного регіону. Розробка методики ґрунтувалася на формалізації аналізу, об'ємному моделюванні досліджуваного об'єкта і прогнозуванні гідроекологічних ризиків. Це в подальшому дозволяє розробити програмне забезпечення з автоматизації зазначених дій, що значно скорочує часові та трудові витрати на прийняття управлінських рішень і їх реалізацію.

У ході роботи використовувались різні групи даних і їх джерела, а в цілому це дозволило обґрунтувати структуру даних та систематизувати інформаційну базу на кожному етапі її застосування [2], [89], [90].

На рис. 4.1 надана методика виконання дослідних обґрунтувань з прогнозування гідроекологічних ризиків внаслідок зрушення гірських порід шляхом комп'ютерного моделювання, яка містить у собі такі етапи [91]:

1. Створення **бази даних**. На цьому етапі визначаються носії, з яких будуть формуватися вихідні дані та здійснюватися вибір конкретних даних, які необхідно відібрати.

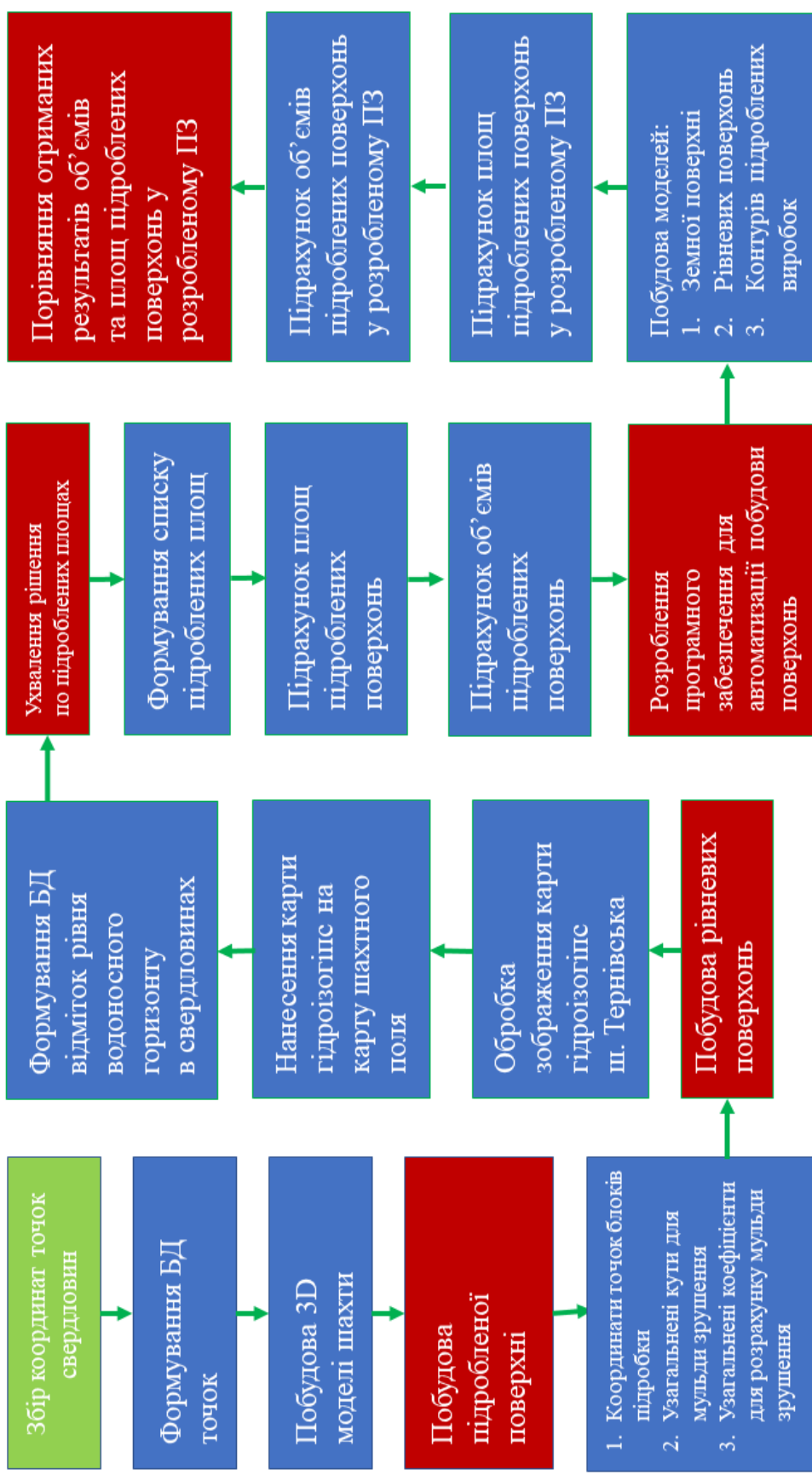


Рисунок 4.1 – Схема дослідницької реалізації методики комп'ютерного прогнозування гідроекологічних ризиків

2. **Побудова поверхонь** – здійснюється побудова вихідної земної поверхні, водоносних горизонтів і вугільних пластів.
3. **Нанесення виїмкових ділянок** є проміжним етапом при побудові підробленої поверхні з нанесенням добувних ділянок для кожного вугільного пласта. За правилами проведення маркшейдерських робіт необхідно розбивати видобувні ділянки на прямокутники різної форми згідно плану гірничих робіт.
4. **Побудова підробленої поверхні** для одного і декількох пластів.
5. **Визначення затоплених ділянок поверхневими водами.**
6. **Визначення об'єму осідань гірських порід.**

З урахуванням цих етапів розроблений алгоритм виконання дослідницької реалізації методики наведено на рис. 4.2.

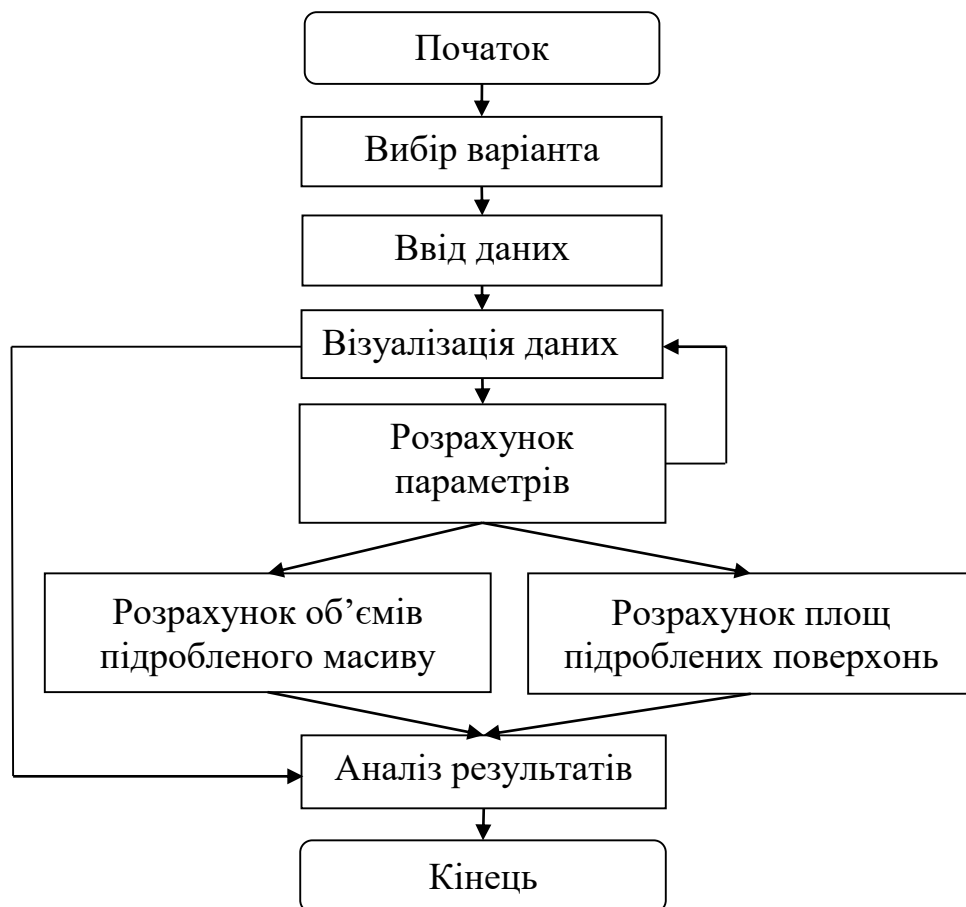


Рисунок 4.2 – Алгоритм виконання дослідницької реалізації поставлених завдань

Як видно з рис. 4.1, фактичною основою дослідницької реалізації з досягнення поставлених завдань є вибір необхідних для моделювання свердловин, які розташовані на плані гірничих робіт, та визначення оптимального розміру сітки з метою отримання необхідної точності побудови моделі підробленого масиву порід.

4.1.2 Характеристика обраного об'єкта досліджень (шахта «Тернівська»)

Вибір об'єкта дослідження (шахта «Тернівська») обумовлений такими факторами, що оптимізують завдання роботи для умов Західного Донбасу:

- найменший розмір шахтного поля – 11,7 км²;
- в чотирьох вугільних пластах С₄^н, С₅, С₆^н, С₈^н потужністю 0,9 – 1,5 м зосереджено близько 15000 тис. т промислових запасів, які при річній виробничій потужності шахти 1200 тис. т/рік будуть відпрацьовані до 2031 року, а очікуване осідання поверхні складає близько 4 м;
- на частині поверхні шахтного поля розташовується місто Тернівка, тому є загроза підтоплення певних ділянок при закритті шахти;
- ситуація ускладнена тим, що через шахтне поле протікають річки Самара, Тернівка і Мала Тернівка;
- через територію шахтного поля проходять автомагістраль і залізниця державного значення Київ – Донецьк;
- по шахті є вся необхідна інформація (геологічна, гідрогеологічна, гідрологічна, гірничотехнічна, плани гірничих виробок та ін.) для виконання повноцінних досліджень і вирішення поставлених у даній роботі питань.

Шахтне поле, розмірами за простяганням 5,3 км, а за падінням 4,0 км, поділене на три блоки й межує на півночі з шахтою «Самарська», а на півдні з шахтою «Павлоградська». В межах гірничого відводу протікають річки Самара, Тернівка, Мала Тернівка. У 10 км від шахти проходить залізнична

магістраль Павлоград – Покровськ. У безпосередній близькості від залізниці функціонує шосейна дорога Київ – Донецьк. Джерелом водопостачання є Павлоградський водозабір і водовід Дніпро – Західний Донбас. Блоки № 1 і № 2 шахтного поля розташовані між Богданівським та Тернівським тектонічними скидами (центральна площа шахтного поля). Блок № 3 знаходиться між Тернівським і Південно-Тернівським скидами (заскидова площа).

На підставі аналізу *гідрогеологічних характеристик гірничого підприємства* встановлено, що підземні води в шахтному полі містяться в четвертинних, неогенових, палеогенових і кам'яновугільних відкладеннях. Найбільш багатководним є бучакський водоносний горизонт, який витриманий за потужністю і площадним поширенням. Відпрацювання запасів вугілля поблизу нього проводиться з залишенням бар'єрних ціликів. У відкладеннях кам'яновугільного віку водомісткими є пласти вугілля і пісковики, які перешаровуються з водотривкими аргілітами та алевролітами.

Фактичний водоприплив по шахті в останні роки при відпрацюванні пластів C_8^H , C_6^H , C_5 , C_4 склав $570 \text{ м}^3/\text{год}$.

Істотний інтерес становлять північно-західна, західна і північна ділянки шахтного поля. Вони розташовані поблизу технічної межі шахти «Павлоградська», для якої опускання земної поверхні вже визначені. Ці ділянки повністю не відпрацьовані, по ним протікає річка Самара. Якщо опускання на зазначених ділянках перевищить опускання на шахті «Павлоградська», то виникне бар'єр. Він перешкоджатиме природному перебігу річки, що може призвести до змін її басейну і русла. При цьому площа порушених земель значно збільшиться.

4.1.3 Вихідні дані

Зберігання та накопичення інформації є важливою частиною технологічного процесу видобування вугілля і згортання гірничих робіт, що вимагає її постійного використання й оновлення. Тому зміст інформації в упорядкованому стані є необхідною складовою нормального функціонування інформа-

ційної технології при розробці методики комп'ютерного прогнозування гідро-екологічних ризиків, що виникають при веденні та завершенні гірничодобувних робіт. Ця обставина зумовлює необхідність приділити особливу увагу систематизації інформації та групуванню вихідних даних. В результаті була розроблена структура, куди входять п'ять груп характеристик, які необхідні при розрахунках і візуалізації результатів:

1. Гірничотехнічні, що містяться в БД, довідковій літературі та документації підприємства. За допомогою цих даних згідно прийнятої методики проводиться розрахунок опускання земної поверхні. Дані характеристики передаються для побудови поверхні опускання і використовуються для подальшого аналізу.

2. Маркшейдерські, які використовують, в першу чергу, для створення математичної моделі шахтного поля.

3. Гідрогеологічні, що використовуються для визначення ділянок, які будуть затоплені, а також зон з виникненням гідроризиків при веденні гірничих робіт.

4. Землекористувацькі, які визначають цільове призначення земельних ділянок, що необхідно для прогнозування і подальшої фіксації економічного збитку, нанесеного землям різного призначення.

5. Економічні, до яких відносяться витрати на матеріальні та трудові ресурси. Вони необхідні для визначення вартості проведення заходів щодо зниження гідроекологічних ризиків.

Дані всіх типів найбільш доцільно зберігати в БД. На рис. 4.3 наведена блок-схема первинних і розрахункових даних шляхом моделювання.

З урахуванням особливостей корпоративної безпеки вугільних підприємств, у роботі вихідні дані знімалися вручну з паперових носіїв.

4.2 Тривимірна модель підробленої земної поверхні

Внутрішні модулі існуючого програмного забезпечення дозволяють відображати гірничі виробки (протяжні й очисні), вугільні пласти, які при вийманні руйнують породний масив і земну поверхню в тривимірному просторі, а також виконувати інші виміри й оцінювання у відповідному масштабі.

Перед тим, як побудувати модель поверхні або пласта, необхідно підготувати дані для їх використання в програмному середовищі. Для цього в програмі Excel проводять об'єднання декількох стовпців даних в один рядок за допомогою формули «=ЗЧЕПИТИ(С9; " , " ; D9 ; " , " ; N9)», де С9, D9, N9 – це відповідні X, Y, Z координати залягання пласта в свердловині [92].



А – первинні дані; Б – дані які розраховуються за моделюванням

Рисунок 4.3 – Структурна схема первинних і розрахункових даних з моделюванням

Таким чином, за допомогою цієї функції з'являється можливість представити XYZ координати в форматі: «X, “,”, Y, “,”, Z».

Результатом є файл з тривимірними координатами геологорозвідувальних свердловин у вигляді:

1845,5320, –125.8

1990,5300, –125.9

2275,4820, –134.2

2730,4425, –145.1

3965,3580, –99

5715,1730, –142.5

5460,1875, –139.9

5190,2000, –143.8

5115,2310, –57.5

Використавши підготовлені дані, де X і Y – координати місця розташування геологорозвідувальних свердловин, Z – абсолютна відмітка устя кожної свердловини, будується земна поверхня досліджуваного об'єкта в програмному забезпеченні для Autocad.

Результатом всієї процедури використання інтерфейсу програми є модель досліджуваного об'єкта, у нашому прикладі це шахта «Тернівська».

На даній моделі необхідне відображення вихідної земної поверхні, рівневої поверхні підземних вод і вугільних пластів C₈, C₆, C₅, C₄. В подальшому слід навести деякі характерні елементи моделювання за допомогою вже існуючих програмних продуктів.

У межах усіх добувних ділянок була прийнята виймана потужність вугільних пластів – 1,05 м. Цей параметр прийнято на шахтах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» виходячи з існуючої технології ведення очисних робіт з урахуванням параметрів механізованих комплексів кріплення і комбайнів.

Таке відображення видобувних ділянок дозволяє перевірити їх коректне розміщення відносно земної поверхні, а також зробити припущення щодо осідань.

Щоб побудувати мульду зрушення необхідно експортувати земну поверхню, вугільний пласт та контури видобувних ділянок у .dxf файл. В подальшому можна використати програму «Підробка», розроблену професором Кучиним О.С. Це програмне забезпечення дозволяє імпортувати побудовані поверхні, перевірити розміщення свердловин на поверхні, а також окреслити мульду зрушення для виробок і будівель [40].

Інтерфейс програми з імпортованими поверхнями та контурами виробок зображено на рис. 4.4.

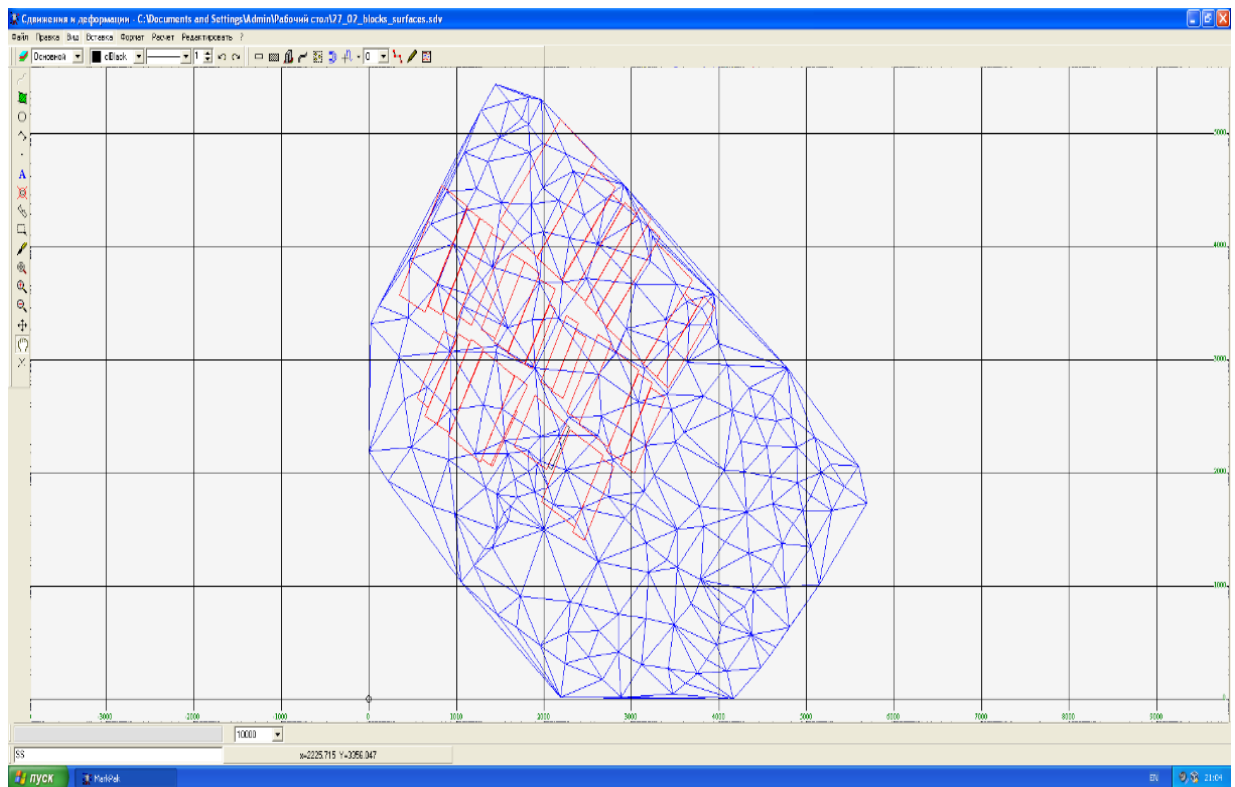


Рисунок 4.4 – Інтерфейс програми «Підробка» з імпортованими поверхнями та контурами очисних виробок

Після отримання мульд зрушення була сформована «Сумісна сітка», яка об'єднує усі мульди у загальний об'єкт, що дозволяє вирахувати усі підроблені ділянки з вихідної непорушеної земної поверхні разом, а не робити вирахування для кожної ділянки окремо.

Для цього у програмі «Підробка» передбачена побудова прямокутників навколо підроблених ділянок якомога ближче до їх меж, і за допомогою функції «Вставка – Сумісна сітка» відображається загальний об'єкт (рис. 4.5).

Після формування сумісної сітки необхідно експортувати результат в Autocad з моделлю вихідної поверхні та інших пластів.

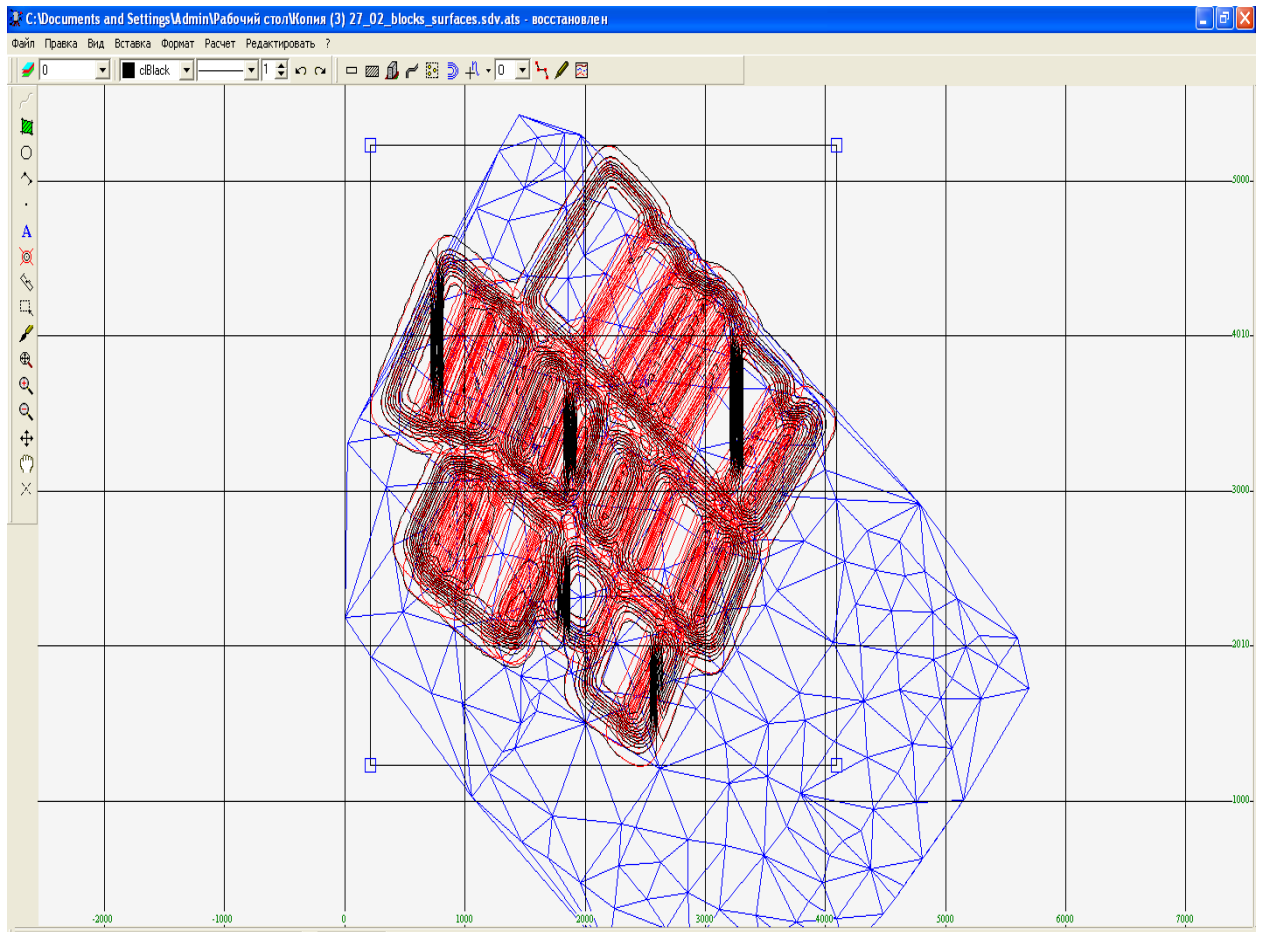
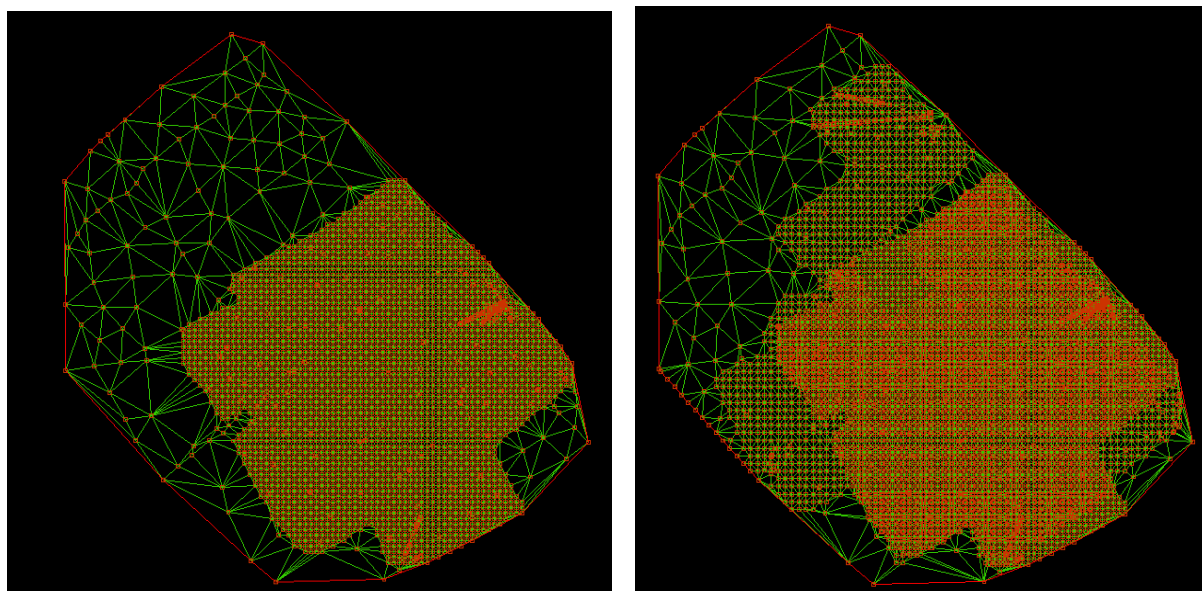


Рисунок 4.5 – Сумісна сітка для усіх підроблених ділянок пласта С₄

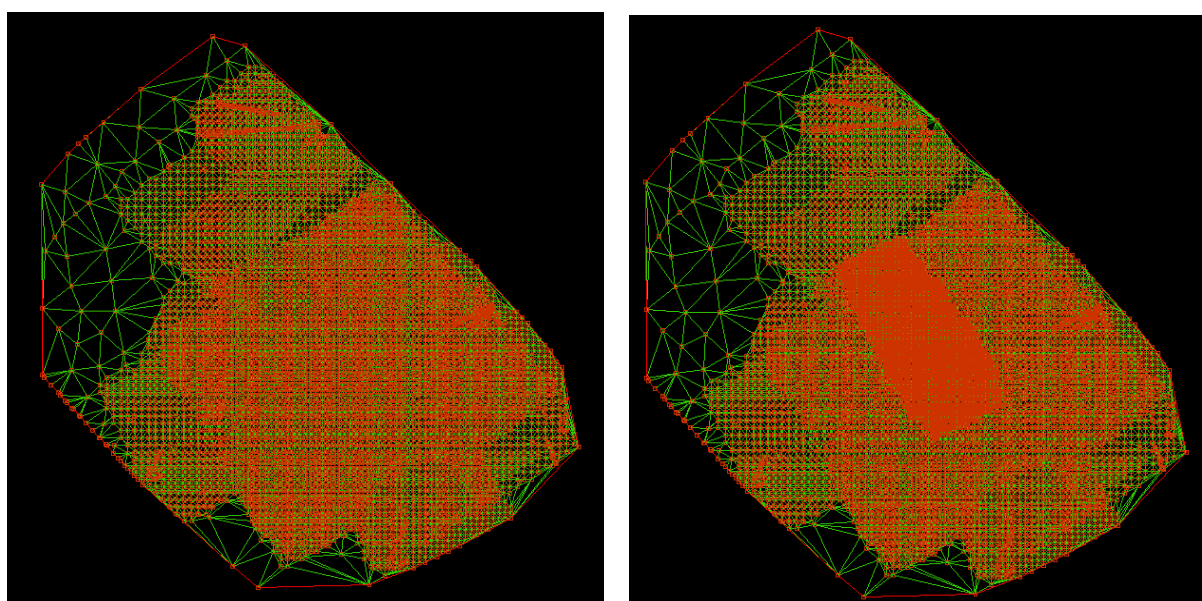
Щоб отримати модель зміненої поверхні при відпрацюванні одного чи всіх чотирьох пластів, необхідно з відображеної вихідної поверхні, поступово вирахувати моделі підроблених ділянок кожного пласта.

Результатом моделювання є загальне уявлення зміненої поверхні, яка наведена на рис. 4.6. З якого видно зміни площ та об'ємів при відпрацюванні пластів, а також змін зони зрушення.



а

б



в

г

а – змінена поверхня після відпрацювання пласта C_4 ; б – пласта C_4 та C_5 ;
 в – пласта C_4 , C_5 та C_6 ; г – змінена поверхня після виймання всіх
 пластів C_4 , C_5 , C_6 та C_8

Рисунок 4.6 – Загальна модель зміненої поверхні після поступового
 відпрацювання пластів C_4 , C_5 , C_6 , C_8

Чисельні результати моделювання надано у таблицях 4.1 і 4.2.

Таблиця 4.1 – Результати моделювання зміни поверхні при вийманні одного та декількох пластів

Показник	Пласт С ₄	Пласти С ₄ та С ₅	Пласти С ₄ , С ₅ та С ₆	Усі пласти разом (С ₄ , С ₅ , С ₆ та С ₈)
Площа між вихідною та поверхнею після осідань, км ²	9,37	14,31	16,35	16,35
Об'єм між вихідною та поверхнею після осідань, км ³	0,0064	0,014	0,024	0,0256

Таблиця 4.2 – Динаміка зміни об'ємів затоплення при вийманні одного або декількох пластів

Показник	Пласт С ₄	Пласти С ₄ та С ₅	Пласти С ₄ , С ₅ та С ₆	Усі пласти разом (С ₄ , С ₅ , С ₆ та С ₈)
Об'єм між вихідною та поверхнею після осідань, км ³	–	0,00002	0,00043	0,00050

Як було зазначено у п.р.1.2 основним недоліком ПЗ САМАРА є те, що для вирішення поставленої в дисертаційній роботі завдання вона вимагає використання додаткового ПЗ для побудови мульди зсуву підробленої гірничими роботами земної поверхні, а також в ній використовується багато ручних операцій, наприклад, для збору та обробки вихідних даних.

Тому для автоматизації процесів керування гідроекологічних ризиків виникає необхідність в розробці власної програмно-інтегрованої технології

одним з елементів якої є програмне забезпечення менеджера гідроекологічних ризиків (МГЕР), яке дозволить оптимізувати процеси керування, відмовитись від використання стороннього ПЗ (наприклад САМАРА) і значно зменшить час на виконання завдань з моделювання та обчислення площі затоплення земної поверхні.

4.3 Програмне забезпечення для відображення наслідків вуглевидобутку і закриття шахт Західного Донбасу, що формують гідроризики на шахтному полі

4.3.1 Обґрунтування методики відображення модельної динаміки опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами на вугільних шахтах

При розробці програмного забезпечення, яке дозволяє прогнозувати гідроекологічні ризики при вуглевидобутку і закритті шахт Західного Донбасу, є питання точності методів розрахунку зон, де виникають такі ризики. Це пов'язано з об'ємами зрушень масиву і поверхні, тому навіть невеликі похибки в розрахунках, при значних об'ємах затоплюваних поверхонь та мульд осідань, можуть призвести до значних втрат ефективності заходів щодо гідроекобезпеки на шахтних полях.

Оскільки одним з важливих завдань моделювання в даній роботі є побудова земної поверхні та водоносного горизонту з метою визначення статичних зон і об'ємів затоплення поверхні шахтного поля, то основними критеріями при виборі методу побудови складної поверхні є:

- відповідність моделі реальному об'єкту;
- можливість оперативного формування моделі та побудови складної поверхні;
- можливість наочного відображення моделі в тривимірному просторі.

Існують відомі пакети геоінформаційних систем як вітчизняні, так і зарубіжні, що дозволяють моделювати земну поверхню при веденні гірничих

робіт. У них, в основному, використовують два види мереж: нерегулярна (триангуляційна) і регулярна (рівномірна прямокутна) [93], [94].

В основу нерегулярної триангуляційної мережі покладена система непересічних трикутників, вершинами яких є вихідні опорні точки. В цьому випадку рельєф уявляється багатогранною поверхнею і для його моделювання використовується триангуляція Делоне [47] (рис. 4.7).

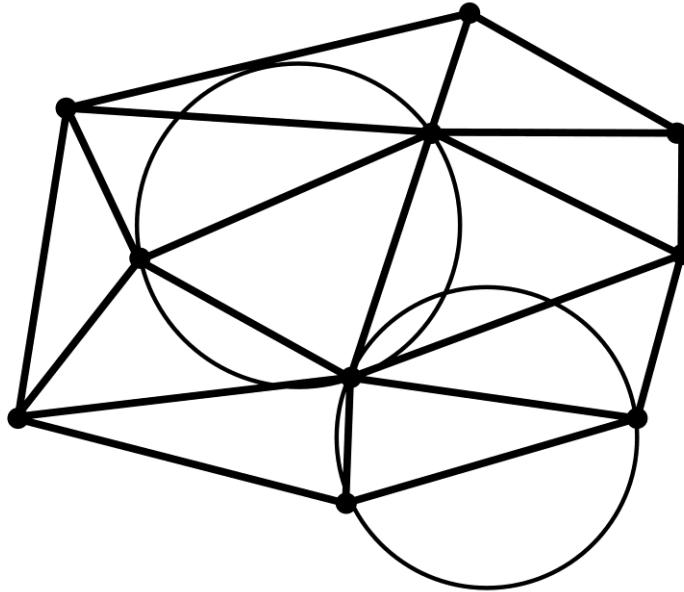


Рисунок 4.7 – Триангуляція, яка задовольняє умові Делоне

На наступних теоремах (посиланнях) ґрунтується значна частина алгоритмів побудови триангуляції Делоне:

- Отримання довільної триангуляції по визначених точках за рахунок перебудови пар тих точок, які не задовольняють умові Делоне. Послідовність триангуляції Делоне – побудова початкової триангуляції з подальшим удосконаленням.

- Сума всіх мінімальних кутів у побудованій триангуляції повинна бути найбільшою.

- Сума радіусів кіл, які описані навколо трикутників, повинна бути найменшою.

Оптимізуючи суми мінімальних кутів або радіусів, які є сумарними характеристиками і фігурують в даних теоремах, можна отримати триангуляцію Делоне.

Перевірка умови Делоне для заданих пар трикутників одна з найважливіших операцій, що виконуються при побудові триангуляції.

Для моделювання земної поверхні важливе значення має тип структури даних, що застосовується в триангуляції. Особливо важливий вибір типу структури в складних гірничотехнічних і геотехнічних моделях, що мають великі бази даних і безпосередньо впливають на швидкість реалізації моделі при триангуляції.

Формування структур в триангуляції здійснюється за допомогою таких основних елементів: ребер (відрізків), трикутників і вузлів (точок і вершин).

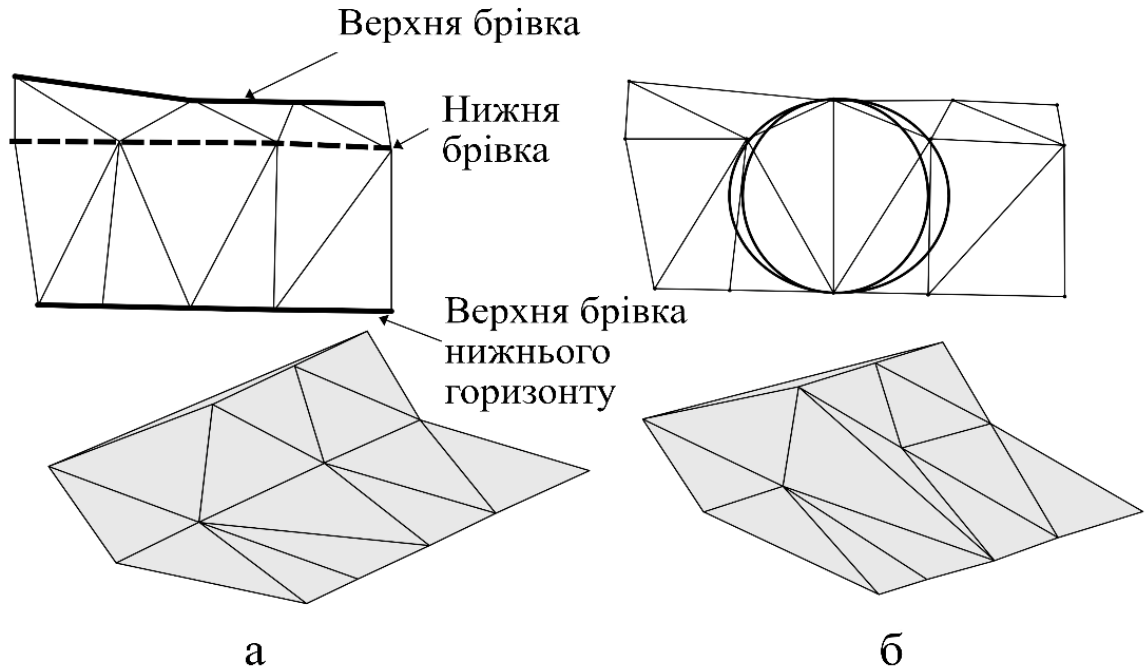
Відсутність перетворення вихідних даних – одне з відмінних переваг триангуляційної моделі. Така модель виключає наявність привнесених похибок, які можуть виникнути в моделях при використанні альтернативних методів. Однак при побудові складних земних поверхонь, порушених гірничими роботами з різкими схилами і перепадами висот, в більшості випадків, метод триангуляції Делоне не забезпечує адекватне уявлення реальних умов.

Це видно на прикладі окремої ділянки, наприклад кар'єрного поля, зображеного на рис. 4.8 в плані і 3D-графіку. Тут поверхня повинна пройти строго по лініях бровок уступу (рис. 4.8, а). При моделюванні даної ділянки за правилами побудови триангуляції Делоне (рис. 4.8, б), описаними вище, видно виникнення скоса, що свідчить про спотворення поверхні, що відображається [47].

Вирішити дану проблему можливо за допомогою додавання на лініях бровок проміжних точок. При цьому слід врахувати, що згущення точок не завжди допомагає позбутися від помилок при побудові.

Також в результаті таких дій збільшиться час реалізації алгоритмів, і при цьому нівелюється перевага даного методу щодо відсутності перетворення вихідних даних.

Моделі на основі триангуляції реалізуються в рамках ГІС-пакетів фірми ESRI, програмного комплексу SURPAC Gemcom [95] – [97].



а – необхідне уявлення (фактичне); б – триангуляцією Делоне

Рисунок 4.8 – Приклад побудови поверхні

При нерегулярній схемі розміщення опорних точок використовується кусково-поліноміальна інтерполяція із застосуванням як ортогональних, так і неортогональних поліномів, рядів Фур'є, ковзного зваженого середнього і деякі інші методи. Як вагову функцію при ковзному зваженому середньому часто використовують функцію λ , обернено пропорційну відстані від даної точки до опорної в r . Найбільш часто застосовують на практиці значення $r = 2$, тобто використовується процедура просторової інтерполяції, яка називається методом квадратів зворотних відстаней.

Крім того, застосовуються локально-стохастичні методи просторової інтерполяції, відомі під назвою «крайгінг-інтерполяція» або просто «край-

гінг». Метод оснований на обліку закономірностей статистичної структури просторового розподілу даної змінної, завдяки чому має перевагу в порівнянні з локальними детермінованими методами, до яких відносяться методи кусково-поліноміальної інтерполяції і змінного середнього. Серед переваг можна відзначити можливість обґрунтування величини радіусу навколо даної точки, яка повинна враховуватися при інтерполяції, вигляду вагової функції, а також можливість оцінки точності просторової інтерполяції. Основою «край-гінгу» є побудова варіограм. При різкій зміні поверхні варіограми будуть нестійкими і їх використання може призвести до значних похибок.

Є досить велика кількість використовуваних методів аналітичного опису поверхонь, покладених в основу просторової інтерполяції даних контрольних (опорних) точок. При цьому результати просторової інтерполяції різними методами відрізняються один від одного іноді досить істотно. Окрему проблему становить вибір кроку мережі.

При використанні регулярних висотних відміток моделі рельєфу є найбільш простими і зручними для різних розрахунків. В цьому випадку область за координатами X , Y повинна мати прямокутний вигляд, і на ній задається сітка вертикальних (при x_1, x_2, \dots, x_n) та горизонтальних (при y_1, y_2, \dots, y_m) ліній. Функція будується на кожній прямокутній (частіше квадратній) клітинці $[x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$ за заданими в кутах клітини висотними позначками Z . Фактично це сітка, розміри якої задаються відповідно до вимог точності конкретної розв'язуваної задачі.

В основу просторової інтерполяції даних контрольних точок покладена значна кількість використовуваних методів аналітичного опису поверхонь [98].

Також окремою проблемою є вибір кроку сітки в побудованій моделі.

Для розв'язання нашої задачі найбільш прийнятним рішенням є використання інтерполяційної та поліноміальної моделей.

Ці моделі будуються на основі регулярної мережі і дозволяють з високою точністю оцінити і порахувати об'єми побудованих поверхонь на основі використання чисельних методів.

Просторова інтерполяція точкових даних ґрунтується на виборі аналітичної моделі поверхні. У загальному випадку поверхня, вочевидь, являє собою функцію двох змінних $Z = f(X, Y)$, задану координатами точок в певній області простору. Кількість і розміщення точок може бути абсолютно довільним. Завдання інтерполяції полягає в побудові за цими даними функції для вибраного контуру, тобто задання алгоритму обчислення функції $f(X, Y)$ в будь-якій точці з координатами X, Y . У зв'язку з неможливістю опису поверхні в межах всієї території однією функцією для просторової інтерполяції поверхонь з регулярним розміщенням опорних точок зазвичай використовують методи локальної інтерполяції. Для визначення змінної в даній точці (вузлі) використовується не вся сукупність наявних даних, а результати вимірювань в точках, що знаходяться навколо цієї точки. При цьому виконують поліноміальну інтерполяцію.

Застосування комп'ютерів для оцінки об'ємів між поверхнями зводиться до використання чисельних методів, тобто поданням об'єму як суми об'ємів елементарних призм. У такій постановці метод об'ємної палетки, який використовується для ручних розрахунків, найбільш підходить для автоматизації. Метод об'ємної палетки застосовувався для визначення об'ємів при поданні поверхонь в числових відмітках по прямокутній сітці або при рівнинному рельєфі, зображеному в горизонталях. Це неприйнятно для підрахунку об'ємів при використанні числових відміток по контурах верхніх і нижніх бровок уступу рельєфу.

Також мають місце методи правильних геометричних фігур. Вони можуть бути використані в тому випадку, коли об'ємна фігура уявляється у вигляді стандартних геометричних тіл: призми, конуса, піраміди, усіченого конуса, усіченої піраміди, обеліска, клина, призматоїда, штабеля. Далеко не завжди можна підібрати відповідну геометричну фігуру. Особливо виникають

проблеми при підрахунку об'ємів відпрацьованих ділянок, коли виїмковий блок має складну конфігурацію. У загальному випадку виникає необхідність вирішення завдання оцінки об'ємів виїмкового блока по контурах верхніх і нижніх бровок рельєфу з різними площами і просторовим розташуванням відносно один одного.

Незважаючи на недоліки розглянутих методів, ідея заміни виїмкового блока геометричною фігурою й уявлення геометрії виїмкового блока як суми елементарних призм покладена в основу розробки універсальних нових методів, що дозволяють значно підвищити точність визначення об'ємів виїмкових блоків будь-яких конфігурацій, тобто при будь-яких просторових розташуваннях контурів поверхонь.

Вихідною інформацією для побудови поверхонь є контрольні точки з координатами X, Y, Z . У нашій задачі координати X, Y – це координати устя свердловини, Z – відмітка її устя і водоносного горизонту. В загальному вигляді Z – довільний показник, за яким проводиться розрахунок для побудови поверхні.

Досліджуваною областю є прямокутник, який описується щодо граничних координат контрольних точок $(X_{min}, X_{max}, Y_{min}, Y_{max})$ [99], [100].

Даний прямокутник покривається рівномірною сіткою з заданим кроком. За цим можна сформулювати інтерполяційну побудову моделі, де показник Z у ij -му вузлі рівномірної сітки розраховується з використанням методу зворотних відстаней за формулою:

$$Z_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N Z_k d_k^{-\alpha}}{\sum_{k=1}^N d_k^{-\alpha}},$$

де N – кількість найближчих точок до вузла ij ;

Z_k – значення позначки в k -й точці;

d_k – відстань від найближчої k -ї свердловини до вузла сітки ij ;

α – показник ступеня інтерполяції.

При цьому зона пошуку найближчих свердловин виконується в плані (за координатами X, Y) і обмежується колом з центром в інтерполяційному вузлі, а радіус його дорівнює заданій відстані. Щоб уникнути впливу ефекту, пов'язаного зі скупченням точок в одних напрямках і відсутністю їх в інших, коло біля вузла рівномірної сітки поділяють на n секторів. Для n доцільно прийняти значення рівне 8. У межах кожного сектора знаходиться одна точка, найближча до даного вузла (рис. 4.9).

Інтерполяційна сітка є основою для побудови стовпчикової та каркасної моделей, які наведені в роботі.

На підставі отриманих значень у вузлах інтерполяційної мережі формується стовпчикова модель. Спочатку формуються квадрати, які стикаються один з одним: їх центри знаходяться в інтерполяційних точках, а сторони рівні кроку інтерполяційної мережі. В результаті отримується поверхня у вигляді прямокутних призм, висота яких дорівнює розрахованому значенню інтерпольованого показника Z (рис. 4.10) [97].



Рисунок 4.9 – Пошук найближчих точок у плані

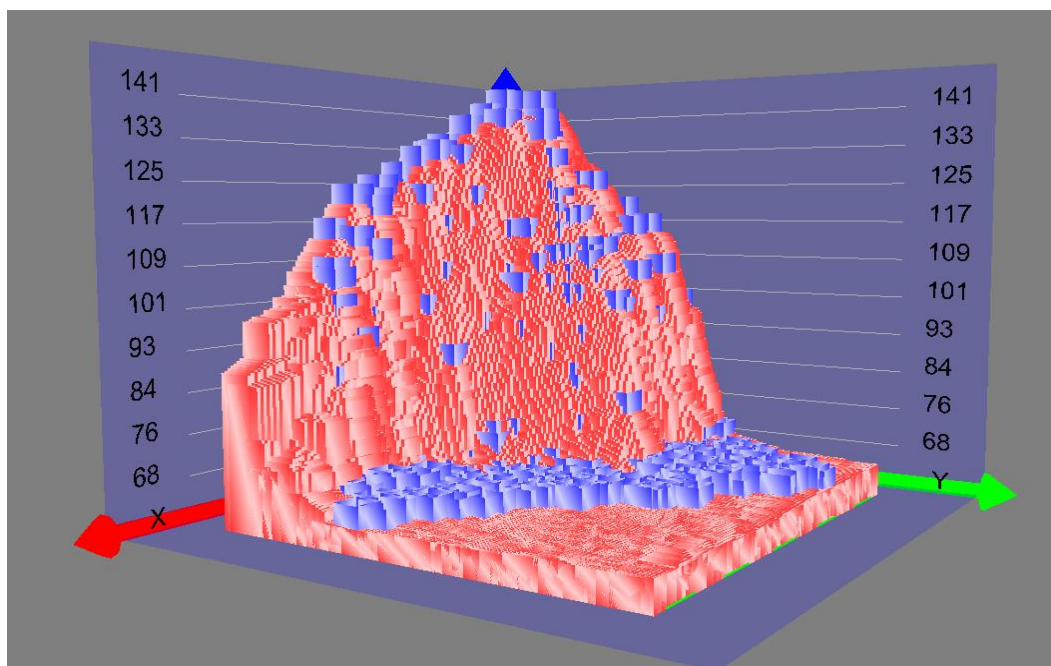


Рисунок 4.10 – Стовпчикова інтерполяційна модель поверхні
(ступінь інтерполяції 2)

Для побудови каркасної моделі необхідно з'єднати лінії інтерполяційними точками в двох взаємних напрямках (рис. 4.11).

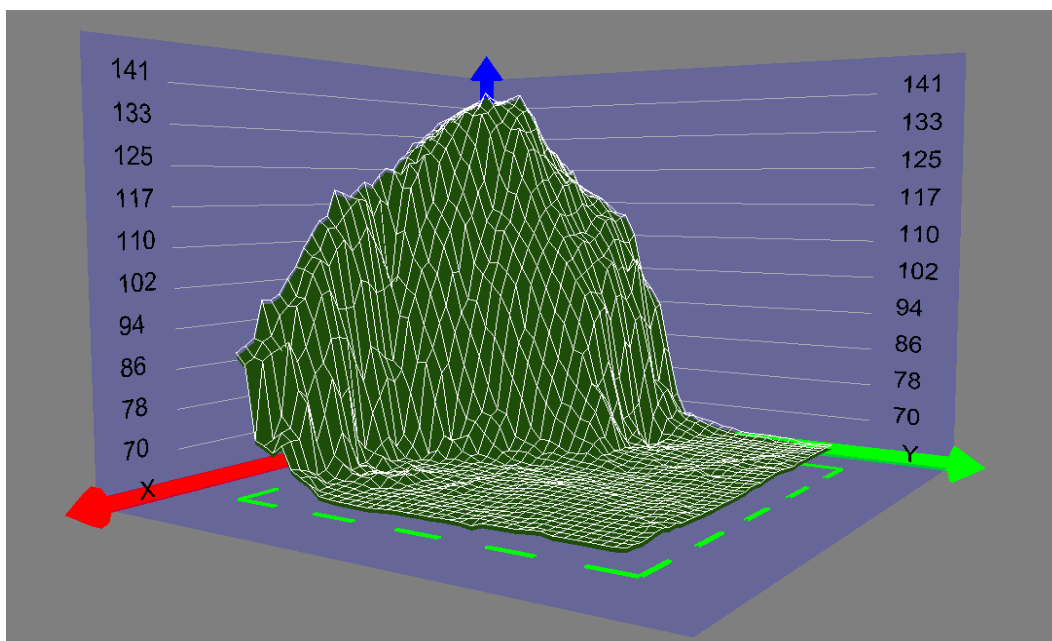


Рисунок 4.11 – Каркасна модель поверхні (ступінь інтерполяції 2)

Отримані прості залежності для визначення коефіцієнтів a_{ls} при невідомих A_0, A_1, \dots, A_{20} і вільних членів b_l :

$$a_{ls} = \sum_{i=1}^n x_i^{k_l+k_s} y_i^{p_l+p_s}; \quad b_l = \sum_{i=1}^n z_i x_i^{k_l} y_i^{p_l},$$

де k_l, p_l – показники ступеня, що залежать від номера рядка l ;

k_s, p_s – показники ступеня, що залежать від номера стовпчика S :

$$k_l = \frac{c_1(c_1 + 1)}{2 - (l + 1)}; \quad k_s = \frac{c_2(c_2 + 1)}{2 - (s + 1)};$$

$$p_l = \frac{l - c_1(c_1 - 1)}{2}; \quad p_s = \frac{s - c_2(c_2 - 1)}{2};$$

$$c_1 = \text{int} \left(\frac{1 + \sqrt{8(l + 1) - 7}}{2} \right), \quad c_2 = \text{int} \left(\frac{1 + \sqrt{8(s + 1) - 7}}{2} \right).$$

4.3.2 Формування вимог для розроблюваного програмного забезпечення

Високорівневий дизайн програмної системи містить шаблони і патерни програмування, деталізовану архітектуру, що описує структуру за допомогою заздалегідь підготовлених і протестованих компонентів та фрагментів коду. Програми, розроблені таким методом, легко піддаються розумінню й аналізу, побудові та системній розробці [47], [101], [102].

Означена сутність цього етапу роботи містить такі два взаємопов'язаних завдання:

- аналіз поточних вимог і прийняття рішення про конфігурацію бажаного продукту з урахуванням поточного опису предметної області;
- створення архітектури програмної системи з використанням існуючих готових рішень у вигляді компонентів програмного забезпечення.

В основі програми, що розробляється, повинен стати блок методів прийняття рішень, який в даному контексті є алгоритмом і вибирає одне рішення з варіантів, запропонованих цим блоком, або видає ранжирований список рішень за певними критеріями.

Для кожної програми існує низка вимог до функціонала, програмної реалізації, платформи реалізації, які обумовлюються специфікою галузі і завдань.

До основних вимог можна віднести [102], [103]:

– **Продуктивність** – здатність програмного забезпечення довготривало працювати з великими об’ємами вхідних даних з віддалених об’єктів і зберігати при цьому повну працездатність, уникаючи таких явищ як псування і втрата даних внаслідок неможливості їх обробити у встановлений час, короткочасне зависання, великий час відгуку на дії користувача та інші подібні ускладнення [104].

– **Коректна обробка даних** – здатність системи коректно обробляти вхідну інформацію, наприклад, дані, що не містять помилок, і дані, що містять різні небажані відхилення, такі як збиті тимчасові мітки, неповні повідомлення, спотворені значення вимірюваних параметрів. Система повинна автоматично їх обробляти і, якщо відсоток помилкових даних може вплинути на правильну роботу, сповіщати про це особу, яка приймає рішення (ОПР). При цьому система повинна мінімізувати інформаційне перевантаження ОПР [105], [106].

– **Вирішення поставлених завдань** – розроблена архітектура програмного комплексу та її функціонал повинні дозволяти вирішувати поставлені завдання.

– **Відмовостійкість** – можливість системи зберігати працездатність за різних позаштатних ситуацій.

– **Безпека** – здатність максимально мінімізувати ймовірність підміни даних та інформаційного саботажу, що може спотворити уявлення про реальний стан віддалених об’єктів з метою різних дій злочинного характеру.

Всі ці вимоги реалізуються в класичній структурі системи підтримки прийняття рішень (СППР), яка складається з таких елементів [107], [108]:

- інформаційне сховище;
- система вилучення інформації;
- система прийняття рішень.

Розробка користувацького інтерфейсу містить в собі дві основні стадії:

1. **UX (User experience)** – відповідає за максимальну зручність користування програмним продуктом при його максимальному наповненні функціоналом.

2. **UI (User interface)** – відповідає за візуальну складову програмного продукту і створює необхідну естетику для найбільш позитивного досвіду користування персональним комп'ютером (ПК).

При цьому, при розробці таких систем, необхідно враховувати специфіку сфери діяльності, в якій буде функціонувати програма. Таким чином, для виконання складних і відповідальних виробничих завдань, визначений для **користувача досвід (User experience)**, виходить на перший план.

Одним з елементів зручного користувацького досвіду є низьке інформаційне перевантаження, яке спостерігається як на організаційному, так і на індивідуальному рівнях. Це зачіпає всі сфери діяльності, в рамках яких ОПР доводиться працювати з інформацією.

Види інформаційного перевантаження наведено на рис. 4.12.

Таким чином, для створення позитивного й успішного користувацького досвіду були сформульовані до визначеного для користувача інтерфейсу такі вимоги:

- **функціональність** – інтерфейс і функції, представлені в ньому повинні відповідати завданням користувача і вирішувати їх;
- **відповідність технології** – необхідно, щоб користувацький інтерфейс був реалізований на тій платформі і за допомогою тих технологій, які будуть зручні користувачеві для вирішення його завдань;

- **чіткість та логічність** – весь функціонал, представлений в інтерфейсі, повинен бути інтуїтивно зрозумілий і зручно розташований;
- **продуктивність** – програма й інтерфейс повинні забезпечувати високу швидкість користувачу;
- **захищеність** – інтерфейс повинен бути розроблений таким чином, щоб виключити можливість здійснення помилок через людський фактор;
- **дружелюбність** – розроблена програма є доступною для швидкого навчання користувачів.

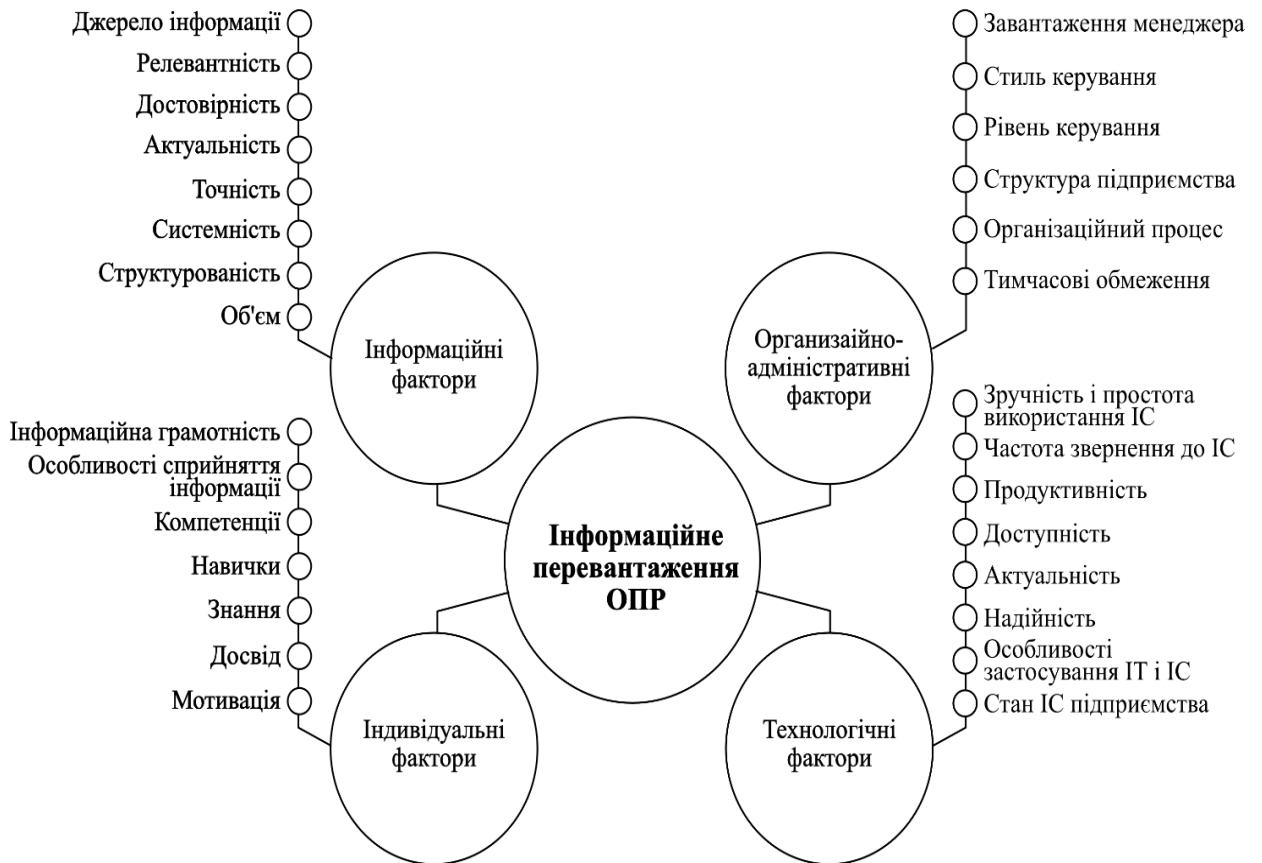


Рисунок 4.12 – Категорії факторів, що впливають на виникнення інформаційного перевантаження ОПР

4.4 Архітектура бази даних для програмного забезпечення

Дані, що збираються геоінформаційними системами, залежно від завдань збору, можуть містити різні характеристики і властивості. Вони можуть бути різної розмірності, з різною кількістю значущих цифр, різним числом розрядів і точності. Таким чином, одним із найголовніших завдань при обробці даних, є зведення різнорідних даних і модулів в єдину несуперечливу інформаційну модель для подальшого аналізу і застосування [109].

Також завдання побудови моделей зрушень земної поверхні та параметризації гідроекологічних ризиків містять в собі проблему великої кількості слабоструктурованих даних.

Все це вирішується за допомогою спеціальних програмних засобів, представлених на ринку, як система керування базами даних (СКБД) [109]. Принципи роботи і побудови БД розглянуто в роботах [110], [111].

Таким чином, використання СКБД як частини системи прийняття рішень [112], [113] дозволяє, з одного боку, систематизувати зібрані дані так, щоб стало можливо уявити і структурувати їх у вигляді орієнтованих БД із зазначенням їх логічних взаємозв'язків, а з іншого боку, – організувати доступ з програмних додатків до сховищ БД.

Так само за допомогою БД, можна робити підрахунок об'ємів осідання земної поверхні за допомогою структурованих даних і потім результати розрахунку вносити в таблицю реляційної бази даних для формування звітів [97].

Для створюваної БД можна сформулювати такі вимоги [40], [112]:

- **актуальність даних за часом** – дані, що зберігаються в БД, є актуальними і відповідають певному часу;
- **повнота даних** – для створення просторової моделі території дані мають бути докладними і повними;
- **актуальність відомостей** – дані та їх категорії повинні містити всі необхідні відомості для проведення аналізу просторової моделі земної поверхні;

- **позиційна точність** – всі поточні та нові дані мають бути сумісні між собою;
- **достовірність** – БД повинна достовірно відображати процеси, які протікають в моделі;
- **легке доповнювання** – нові дані повинні вводитися швидко і легко;
- **якісне редагування** – поточні та нові дані повинні зручно, швидко і легко змінюватись за завданням користувача;
- **доступність** – використання БД має бути доступне для всіх необхідних категорій користувачів.

Таким чином, маючи вимоги, можна безпосередньо перейти до розробки моделі БД.

У підрозділі 4.1.3 при формуванні методики мінімізації гідроекологічних ризиків були вибрані похідні дані для побудови моделей земної поверхні, пластів та водоносного горизонту.

Ці дані склалися з:

- назви свердловини;
- X координати, м;
- Y координати, м;
- Z1 координати, м (відмітка гирла свердловини);
- Z2 координати, м (глибина свердловини);
- H координати, м (потужність вугільного пласта).

Додатково до цього додаються дані, що стосуються інформації про контури підробки, які розташовані на кожному пласті:

- назва точки контуру;
- назва вугільного пласта, на якому розташований контур;
- X координата точки контуру, м;
- Y координата точки контуру, м;
- Z3 глибина залягання точки контуру, м.

Наступним кроком є організація цих даних у таблиці БД зі встановленими взаємозв'язками.

Після вивчення похідних даних та визначення, які з них слід використати, необхідно їх організувати у таблицях за допомогою БД Microsoft Access, яка є оптимальним варіантом для користувачів на підприємствах.

Прийmemo, що БД буде побудована з таких таблиць:

1. Об'єкти – таблиця, яка містить інформацію про шахти, які збережені в програмі. Завдяки цьому програма може виводити та опрацьовувати дані за декількома шахтами.
2. Поверхні – містить інформацію про вугільні пласти для кожної шахти.
3. Точки (загальна інформація) – дані для однієї свердловини краще всього поділити за змістом. До загальної інформації можна віднести X координату, Y координату, Z1 координату земної поверхні.
4. Точки (інформація за пластами) – уся інша інформація, а саме глибина залягання корисних копалин для кожного пласта.
5. Точки контуру – на кожному пласті існує набір контурів підробки, тому потрібно в окремій таблиці зберігати дані (назва точки, назва пласта, X координата та Y координата).

Таким чином, після формування даних, які необхідно зберігати в БД, можна побудувати за допомогою конструктора таблиць (рис. 4.13 – 4.17).

Field Name	Data Type
Object_id	AutoNumber
Object_name	Short Text

Рис. 4.13. Конструктор таблиці «Об'єкти»

Field Name	Data Type
Plast_id	AutoNumber
Object_id	Number
Plast_name	Short Text

Рисунок 4.14 – Конструктор таблиці «Поверхні»

Field Name	Data Type
Point_number	Number
Object_id	Number
X point	Number
Y point	Number
Z surface	Number
Z water	Number

Рисунок 4.15 – Конструктор таблиці «Точки (загальна інформація)»

Field Name	Data Type
ID	AutoNumber
Plast_id	Number
Point_number	Number
Z_glubina_plasta	Number
h_moschnost_plasta	Number
Zona_narusheniy	Yes/No

Рисунок 4.16 – Конструктор таблиці «Точки (інформація за пластами)»

Field Name	Data Type
Plast_Id	Number
Point_Id	AutoNumber
Point_name	Short Text
X	Number
Y	Number
Z	Number
Block_id	Number

Рисунок 4.17 – Конструктор таблиці «Точки контуру»

Після побудови таблиць у конструкторі та із застосуванням зв'язків, буде отримана модель БД, яка зображена на рис. 4.18.

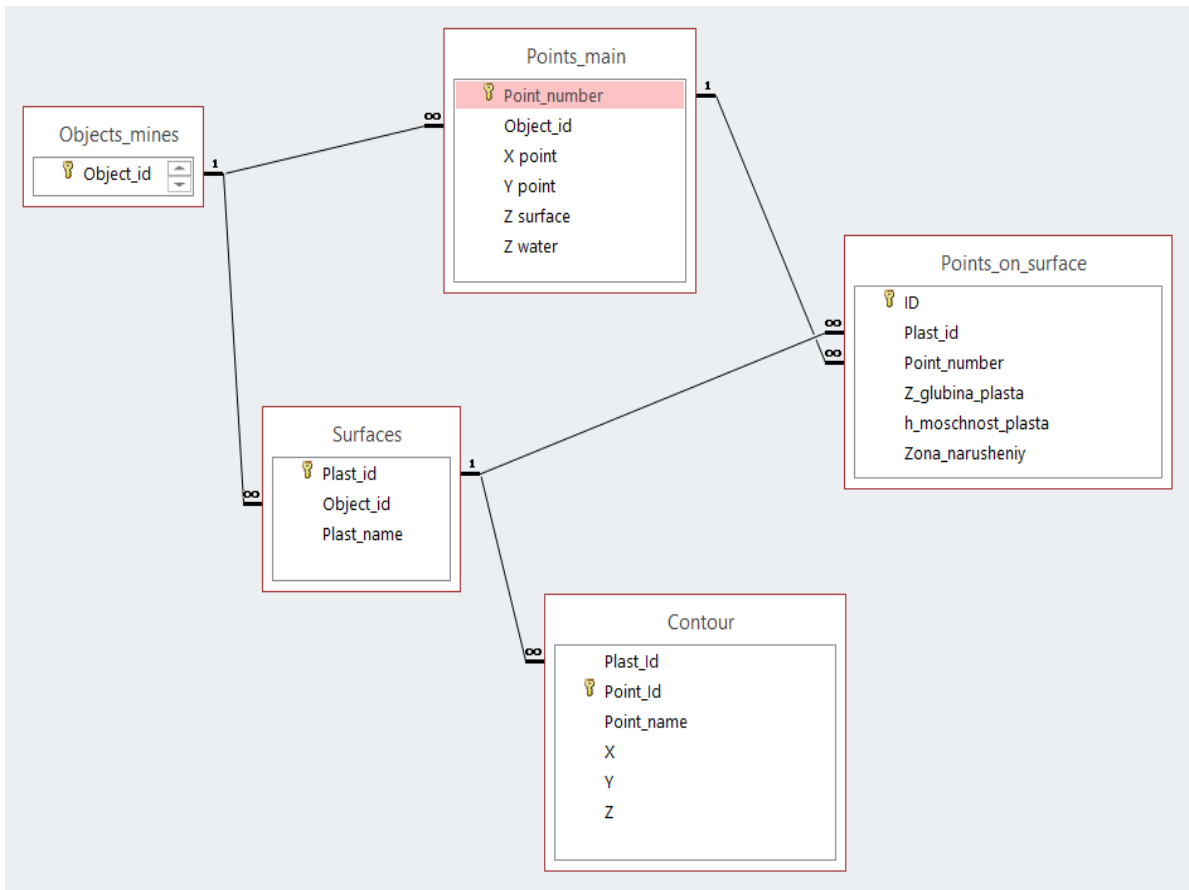


Рисунок 4.18 – Модель бази даних

На цій моделі можна побачити зв'язки між таблицями, а саме:

1. `Object_mines` – `Surfaces` – де поле `Object_id` зв'язується за допомогою зв'язку «1 до багатьох». Це дозволяє кожному об'єкту (шахті) призначити поверхні.
2. `Surfaces` – `Contour` – де поле `Point_id` також зв'язується за допомогою зв'язку «1 до багатьох». Це дозволяє зв'язати багато точок контуру з 1 об'єктом.
3. `Object_mines` – `Points_main` – за допомогою поля `Object_id` можна зв'язати набір з загальної інформації свердловин з конкретною шахтою.
4. `Points_main` – `Points_on_surface` – за допомогою поля `Point_number` кожній свердловині присвоюється з таблиці `Points_main`, яка

відображає загальну інформацію про свердловину, дані про глибину залягання кожного пласта з Points_on_surface.

Наступним кроком після створення БД є перенесення даних з раніше створеної таблиці Excel у Microsoft Access.

Перенесення даних з файлу Excel у БД Microsoft Access є стандартною процедурою. Завдяки цій процедурі будуть заповнені таблиці, фрагменти яких зображено на рис 4.19 – 4.23.

	Object_id	Object_name
+	1	ш. Тернівська
*	(New)	

Рисунок 4.19 – Наповнена таблиця «Об’єкти»

	Plast_id	Object_id	Plast_name
+	1	1	C4
+	2	1	C5
+	3	1	C6
+	4	1	C8

Рисунок 4.20 – Наповнена таблиця «Поверхні»

	Point_numbe	Object_id	X point	Y point	Z surface	Z water
+	156	1	2440	840	113.6	64.57
+	292	1	3425	2690	65.5	0
+	306	1	3100	2625	64.9	62
+	322	1	4090	1390	64.9	62
+	326	1	1390	4750	65.7	62.25
+	346	1	4920	1915	65.2	62
+	358	1	2730	4425	65.7	62.52
+	364	1	3440	3145	65.3	62.27
+	384	1	1605	3280	66.3	64.92
+	392	1	2510	3720	64.7	62.37
+	618	1	1440	1330	134.4	0
+	664	1	2480	4275	65.9	62.56
+	853	1	4825	630	86.4	63.02
+	858	1	3135	305	96.4	65.09
+	859	1	4185	0	113.8	64.39

Рисунок 4.21 – Фрагмент таблиці «Точки (загальна інформація)»

ID	Plast_id	Point_number	Z_glubina_pl
16	1	156	-149.6
20	1	292	-160.3
24	1	306	-153.5
28	1	322	-161.5
32	1	326	-140.4
40	1	358	-145.1
44	1	364	-158
48	1	384	-167.4
56	1	618	-159.1
60	1	664	-147
64	1	853	-167.9
68	1	858	-168.5
72	1	859	-166.1
76	1	862	
80	1	866	-133
88	1	909	-131.3
96	1	932	-180.5
100	1	933	-150.5
104	1	934	-144.1
108	1	953	-158

Рисунок 4.22 – Фрагмент таблиці «Точки (інформація за пластами)»

Plast_id	Point_id	Point_name	X	Y	Z
*	0	(№)	0	0	0

Рисунок 4.23 – Фрагмент таблиці «Точки контуру»

Отже, проміжним результатом створення моделі та наповнення БД є готова БД для її використання розроблюваною програмою.

4.5 Реалізація розробленого програмного забезпечення у ролі дослідницької апробації

Після формування основних вимог до функціонала та дизайну програмного забезпечення (ПЗ) і формування архітектури БД, наступним етапом розробки програмного забезпечення є його реалізація у ролі дослідницької апробації.

Для реалізації СППР менеджер гідроекологічних ризиків «МГЕР» були розглянуті такі типи програм:

1. **Веб-додаток** – представлений у вигляді сайту або веб-порталу, розміщеного на хостингу в мережі Інтернет.

Перевагою такого типу програми є те, що перебуваючи в мережі доступ забезпечується з будь-якого пристрою і будь-якої точки світу, де є інтернет-браузер.

Недоліки – необхідність включати у витрати наявність хостингу; низька захищеність веб-дodatка і деяка обмеженість даної архітектурної платформи через відсутність необхідних бібліотек і елементів.

2. **Десктопний додаток** – представлений у вигляді програми, що встановлюється на робочий ПК.

Перевагою такого додатка є його надійність. Відсутня необхідність обов'язкового розміщення на сервері в мережі Інтернету, широка технологічна підтримка різними бібліотеками й елементами.

Недоліками є обмеженість використання програми, яка викликана рамками платформи, під яку програма розробляється.

3. **Мобільний додаток** – додаток для смартфонів і планшетів є дуже зручним рішенням в тих випадках, коли функціонал додатка змушує проводити роботи в полі або в дорозі:

Перевагами такого додатка є мобільність.

Недоліками є обмеженість платформи через відсутність необхідних бібліотек і елементів.

Таким чином, порівнявши недоліки і переваги кожного типу додатка, для розробки СППР «МГЕР» найбільш оптимальним варіантом програми слід вибрати: «Десктопний додаток».

У свою чергу оптимальним варіантом технології розробки програмного забезпечення є крос-платформна програмна технологія Microsoft.NET у поєднанні з об'єктно-орієнтованою мовою програмування C++.

4.5.1 Розробка інтерфейсу ПЗ для менеджера свердловин

Переваги використання технології Microsoft.NET також полягають у тому, що ця платформа містить у собі велику кількість модулів, бібліотек та елементів інтерфейсу, готових до використання, що дозволяє прискорити процес реалізації ПЗ «МГЕР».

Першим кроком є розробка «Менеджера свердловин», який дозволить відображати, та опрацьовувати дані з БД, розміщеної у Microsoft Access. Для вирішення цього завдання було розроблено перше вікно, яке відображає наявні об'єкти (шахти) у програмі та наведено на рис. 4.24.

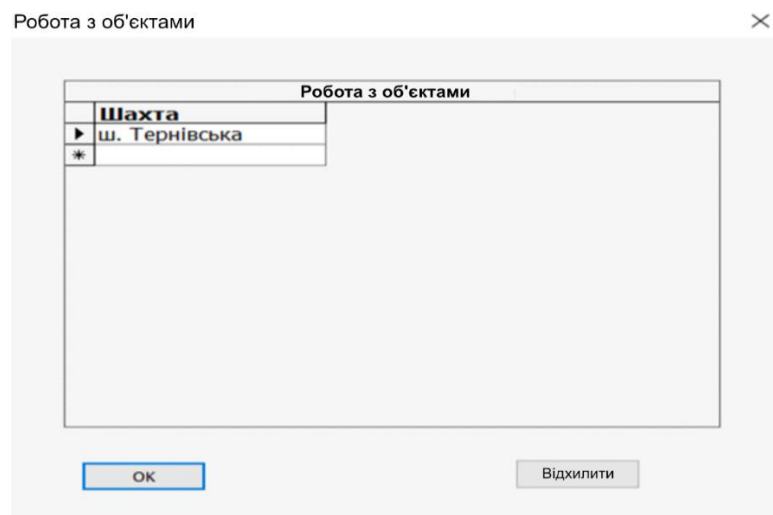


Рисунок 4.24 – Інтерфейс вікна «Робота з об'єктами»

Далі було розроблене вікно «Робота з таблицею свердловини» (рис. 4.25), що є найголовнішим, і дозволяє додавати, редагувати та видаляти загальну інформацію про свердловини.

Це вікно відображає такі дані:

- назва свердловини – стовпець Point_number.
- до якого об'єкта належить свердловина – стовпець Object_id.
- X координата, м – стовпець X Point.
- Y координата, м – стовпець Y Point.
- відмітка устя свердловини, м – Z surface.
- відмітка водоносного горизонту, м – Z water.

Робота з таблицею Свердловини

Вибір об'єкта

ш. Тернівська

Робота з таблицею Свердловини						
Point number	Object id	X Point	Y Point	Z Surface	Z wat	^
1427	1	240	1930	118.2	66.87	
2502	1	1845	5320	66.8	62	
13061	1	1990	5300	66.2	62	
6739	1	2275	4820	65.2	62.58	
358	1	2730	4425	65.7	62.52	
6236	1	2935	4550	65.2	63.27	
14773	1	2895	4380	65.1	0	
14772	1	3115	4240	65.3	0	
14771	1	3220	4160	65	0	
14769	1	3260	4095	65.4	0	
6240	1	3965	3580	66.4	63.12	
2549	1	5620	2055	64.6	62.36	
2554	1	5715	1730	64.7	62.29	
2547	1	5460	1875	64.9	62.05	
2536	1	5295	2070	65.3	62.09	
2507	1	5190	2000	65	62	
3005	1	5115	2310	65.6	62.21	
2533	1	4910	2225	65.4	62	
2564	1	4850	2485	64.8	62.21	
2520	1	4600	2460	65.5	62.05	

Рисунок 4.25 – Інтерфейс вікна «Робота з таблицею свердловини»

Додатково можна зазначити, що інтерфейс вікна «Робота з таблицею свердловини» надає функцію виведення даних за об'єктами, що дозволяє зберігати набір свердловин для декількох шахт.

Також для комфорту користувача існує функція навігація за записами та пошуку конкретної свердловини у полі «Навігаційна панель».

У свою чергу глибина залягання вугільних пластів C_4 , C_5 , C_6 , C_8 , як додаткова інформація, відображається у вікні «Робота з таблицею Точки пласта» (рис. 4.26).

Варто зазначити, що у вікні «Робота з таблицею Точки пласта» додатково до виведення даних за об'єктами також існує виведення даних для окремих свердловин за кожним пластом.

Робота з таблицею Точки пласта

×

Робота з таблицею Точки пласта					
Plast id	Point number	Z glubina plasta	h moschnost plasta	Zona narusheniy	
1	156	-149.6	0	0	
1	292	-160.3	0	0	
1	306	-153.5	0	0	
1	322	-161.5	0	0	
1	326	-140.4	0	0	
1	358	-145.1	0	0	
1	364	-158	0	0	
1	384	-167.4	0	0	
1	618	-159.1	0	0	
1	664	-147	0	0	
1	853	-167.9	0	0	
1	858	-168.5	0	0	
1	859	-166.1	0	0	
1	862		0	0	
1	866	-133	0	0	
1	909	-131.3	0	0	
1	932	-180.5	0	0	
1	933	-150.5	0	0	
1	934	-144.1	0	0	
1	953	-158	0	0	
1	961	-157.5	0	0	

Вибір об'єкта
 ш. Тернівська

Вибір пласта
 С4

Вибір свердловини

Рисунок 4.26 – Інтерфейс вікна «Робота з таблицею Точки пласта»

Останні 2 вікна присвячені виведенню даних точок для контурів підробок земної поверхні за кожним пластом, що наведено на рис. 4.27 і виведенню даних про наявні та збережені вугільні пласти для конкретного об'єкта (рис. 4.28).

Робота з таблицею Контури

×

Робота з таблицею Контури					
Plast id	Point name	X	Y	Z	
*					

Вибір об'єкта
 ш. Тернівська

Вибір пласта
 С4

Рисунок 4.27 – Інтерфейс вікна «Робота з таблицею Контури»

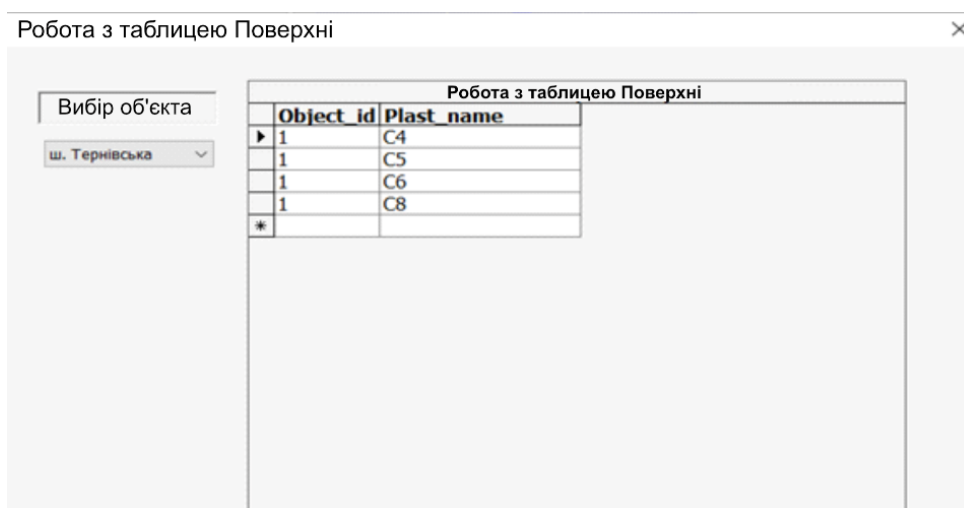


Рисунок 4.28 – Інтерфейс вікна «Робота з таблицею Поверхні»

4.5.2 Реалізація інтерфейсу програмного забезпечення для побудови моделі

Наступним кроком після реалізації «Менеджера свердловин» та введення даних з БД є розробка аналогічної дії щодо функціонала для виведення похідних даних у вигляді моделі [114], [115] .

Першим етапом стало виведення даних у вікні «Вихідні дані», що зображено у вигляді синіх стовпчиків на рис. 4.29.

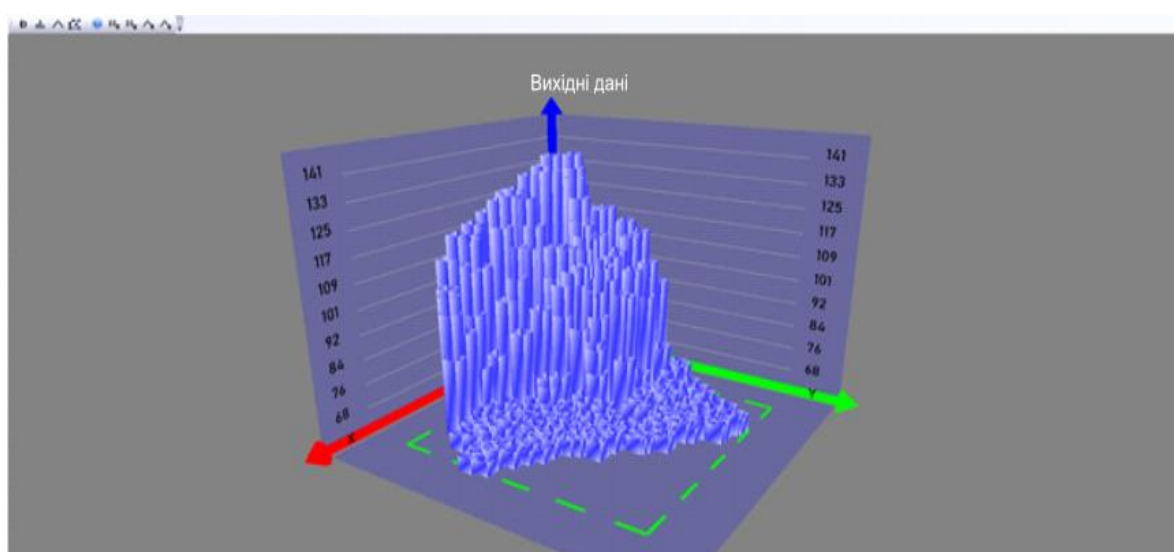


Рисунок 4.29 – Інтерфейс вікна «Вихідні дані»

Після цього для побудови повноцінної поверхні була проведена побудова моделі (рис 4.30) за допомогою формул інтерполяції, які були описані у підрозділі 4.3.1. Такі дані зображено у вигляді червоних стовпчиків.

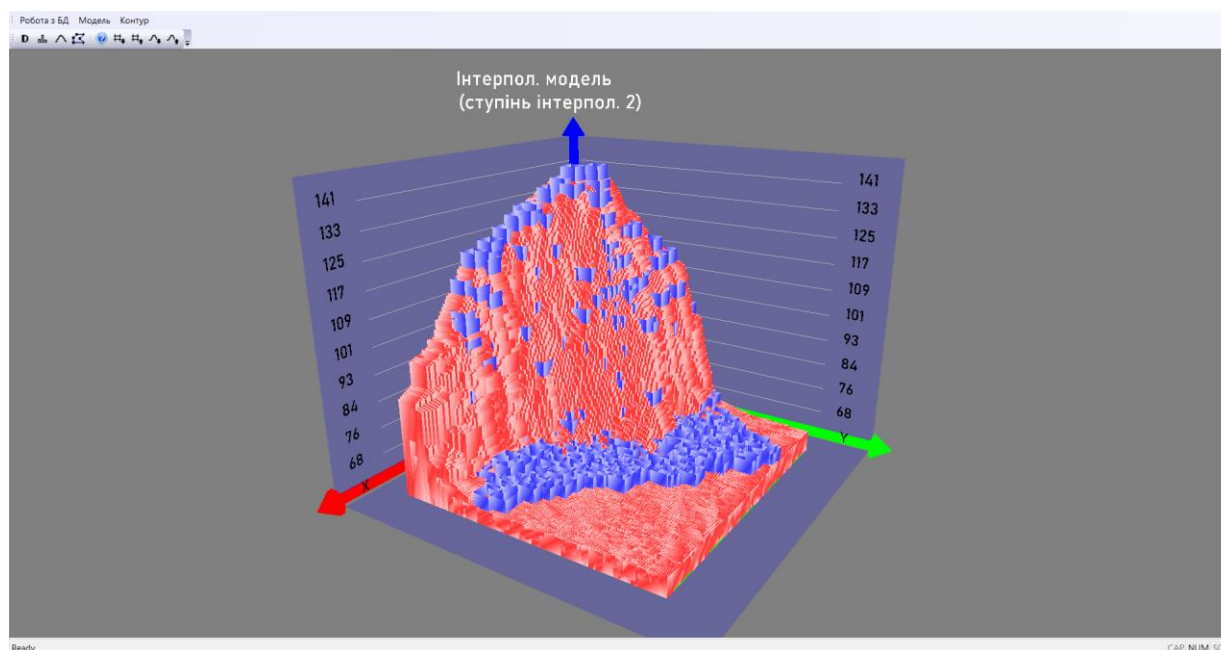
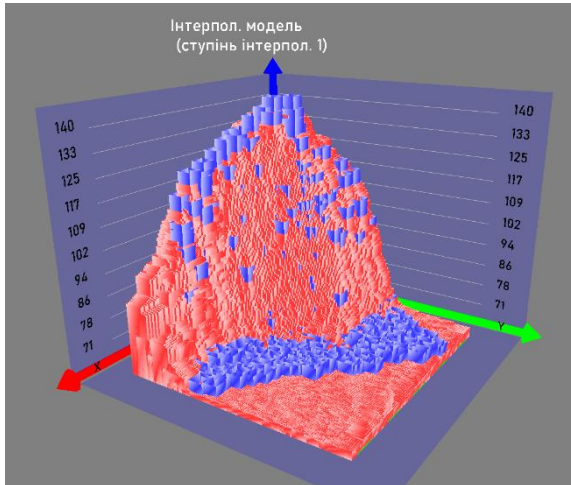


Рисунок 4.30 – Інтерфейс вікна «Інтерполяційна модель»
(ступінь інтерполяції 2)

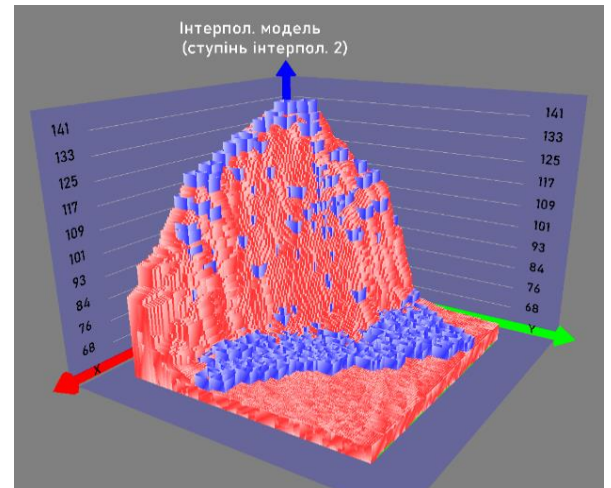
Додатково варто зазначити, що за замовчуванням модель виводиться у 2-му ступені інтерполяції, що є оптимальним для побудови детальної моделі поверхні.

Загалом, можна розраховувати та додавати похідні дані у першій, другій, третій та четвертій ступенях інтерполяції, зображених на рис. 4.31.

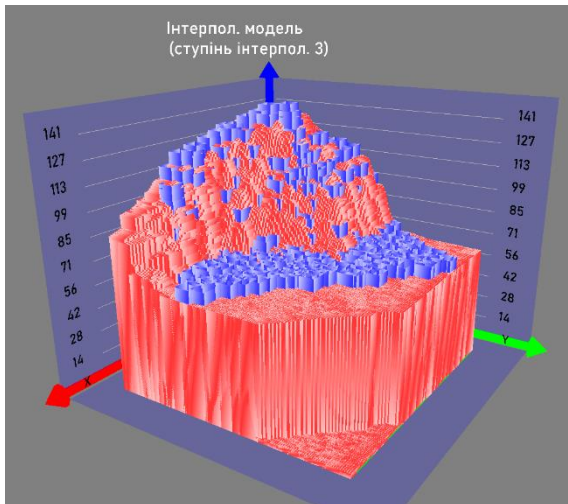
Інтерполяція у використаному вигляді це приблизне (чи точне) знаходження будь-якої величини за деякими відомими значеннями цієї величини (іншим словом – відновлення).



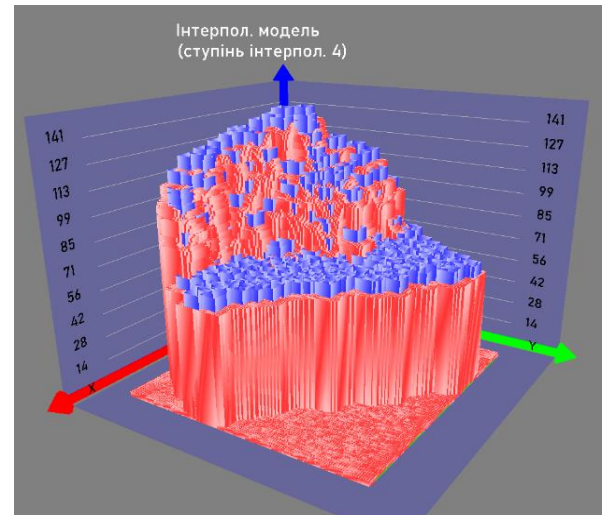
а



б



в



г

а – першій; б – другій; в – третій; г – четвертій

Рисунок 4.31 – Відображення інтерполяційної моделі у різних ступенях інтерполяції

Процес інтерполяції похідних даних створює достатню кількість цих даних для виведення Каркасної моделі, яка показує похідну земну поверхню і водоносний горизонт (рис. 4.32).

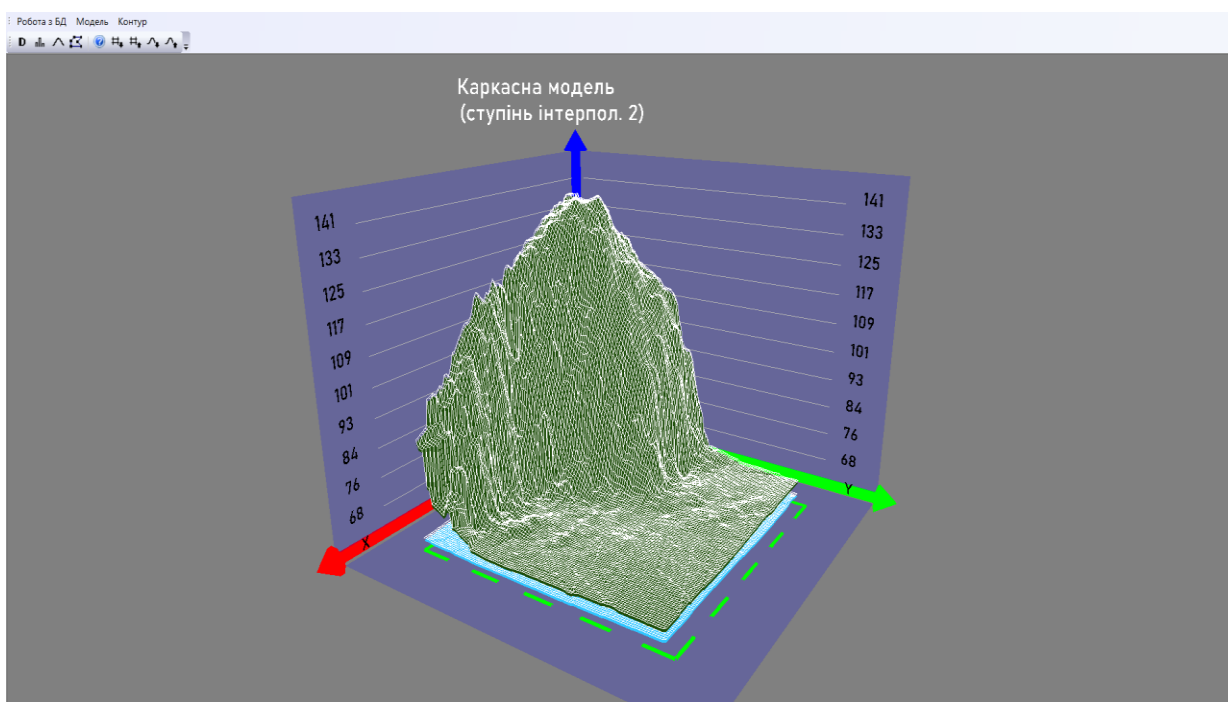


Рисунок 4.32 – Інтерфейс вікна «Каркасна модель» із зображенням земної поверхні та водоносного горизонту (ступінь інтерполяції 2)

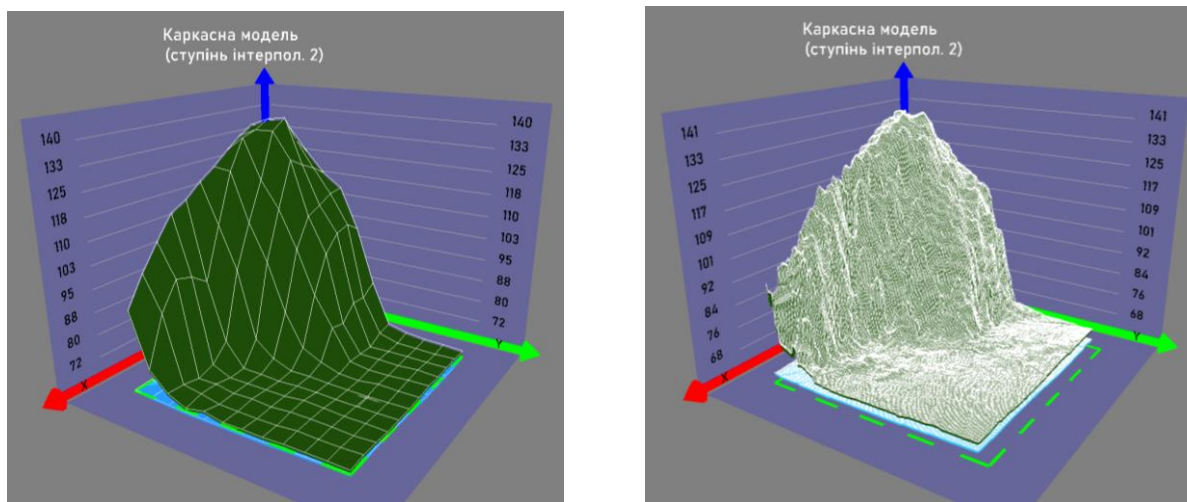
У програмі для «Каркасної моделі» присутній функціонал, який дозволяє змінювати крок сітки. Завдяки цьому можна відображати різну деталізацію поверхні у проміжку від 10 м до 500 м (рис. 4.33).

Поліноміальна модель дозволяє зробити прогноз розвитку того чи іншого процесу, тому ця функція є корисною при побудові підробленої поверхні рис. 4.34

Ступінь поліноміальної моделі також може змінюватися.

Маючи реалізовану програму для відображення похідних поверхонь, можна приступити до наступного кроку – побудови підробленої поверхні для одного та декількох пластів.

Тривимірна «Каркасна модель» з різним рівнем деталізації є необхідним функціоналом для побудови зміненої поверхні для одного чи декількох пластів.



а

б

а – крок сітки 500 м; б – крок сітки – 10 м

Рисунок 4.33 – Інтерфейс вікна «Каркасна модель» з різним кроком сітки
(ступінь інтерполяції 2)

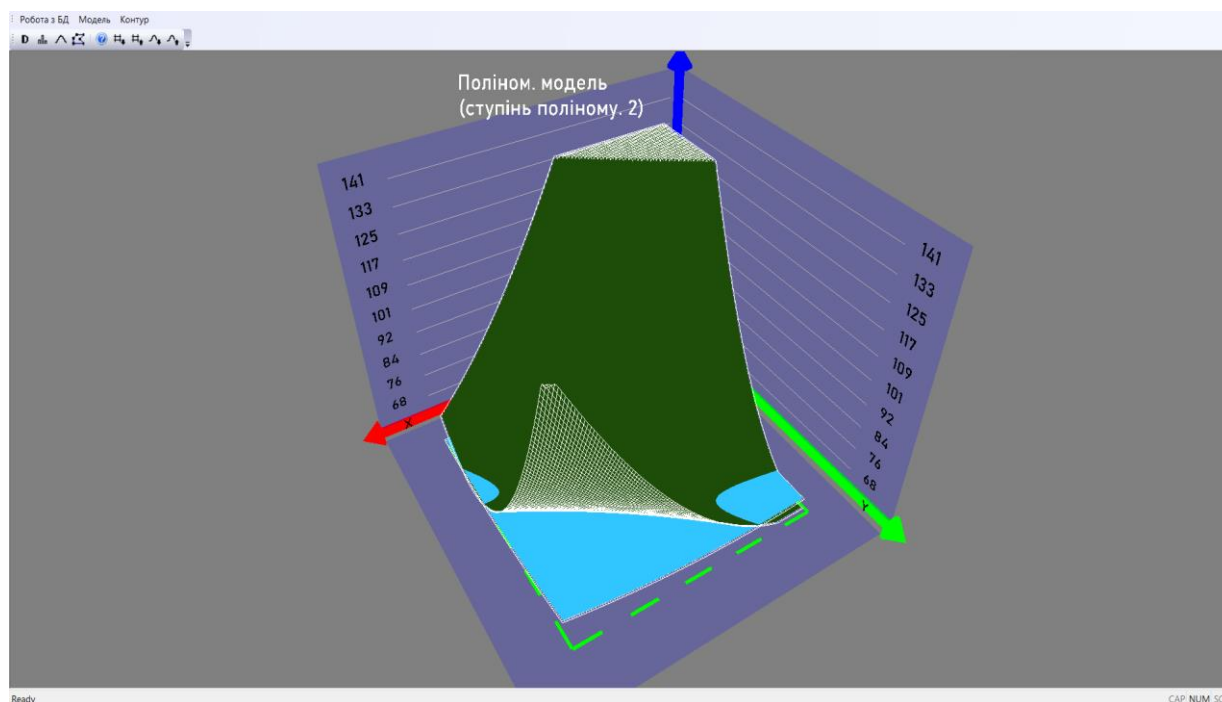


Рисунок 4.34 – Інтерфейс вікна «Поліноміальна модель»
(ступінь інтерполяції 2)

У процесі формування зміненої поверхні активно використовується таблиця БД «Контури».

Для виведення на моделі контурів гірничих виробок потрібно за допомогою функції «Контур – Вибір контуру» на головному меню визвати вікно керування контурами (рис. 4.35).

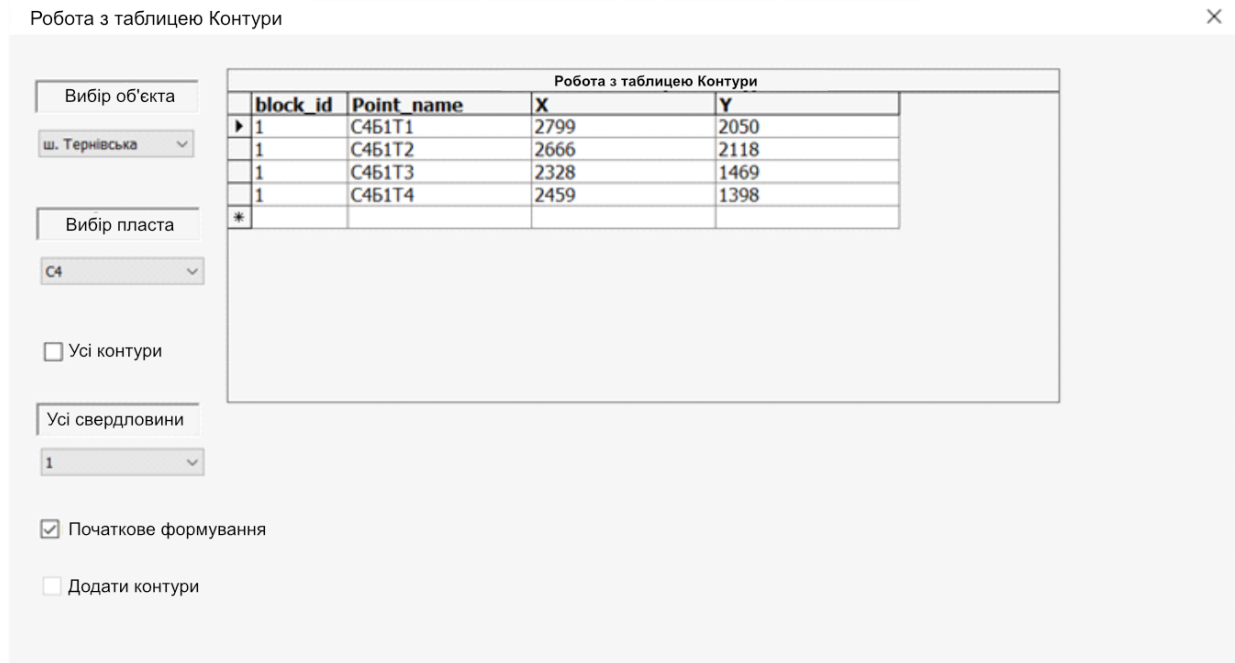


Рисунок 4.35. – Інтерфейс вікна «Робота з таблицею Контури»

У цьому менеджері контурів користувачеві доступні такі функції: як вибрати шахту, вибрати пласт, вибрати усі контури чи один, вивести контури окремо, додати контури до відображення. Якщо ми виберемо усі контури для пласта С₄, то вони відобразяться зверху моделі, як на рис. 4.36. Таке відображення дозволить уникнути візуального перевантаження моделі, особливо коли виводяться контури для декількох пластів одночасно.

Для того аби зрозуміти розміщення контурів на площині, необхідно повернути модель до ХУ-виду (рис. 4.37).

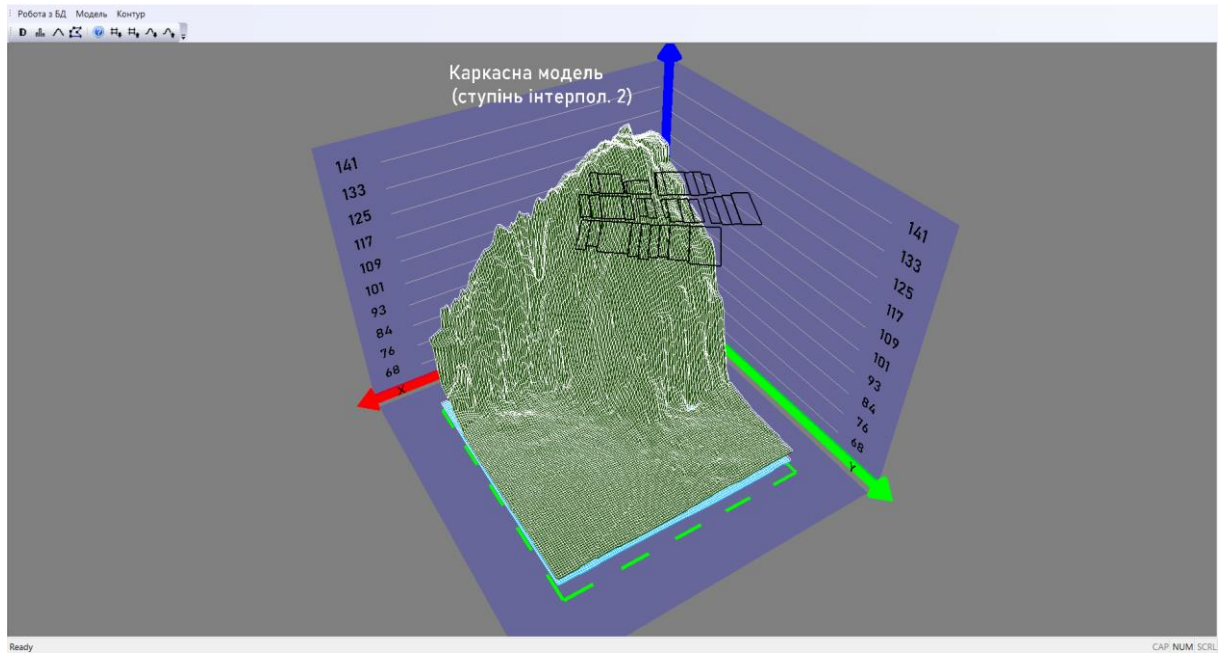


Рисунок 4.36 – Вивід усіх контурів пласта С₄ над «Каркасною моделлю»
(ступінь інтерполяції 2)

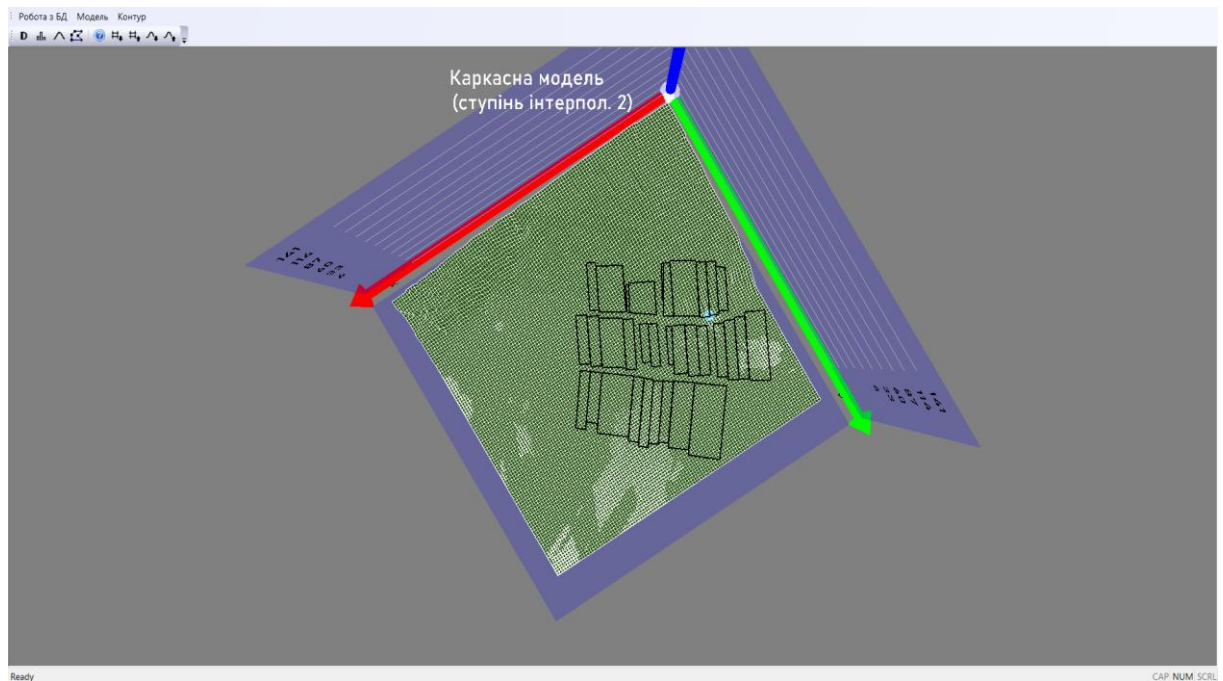
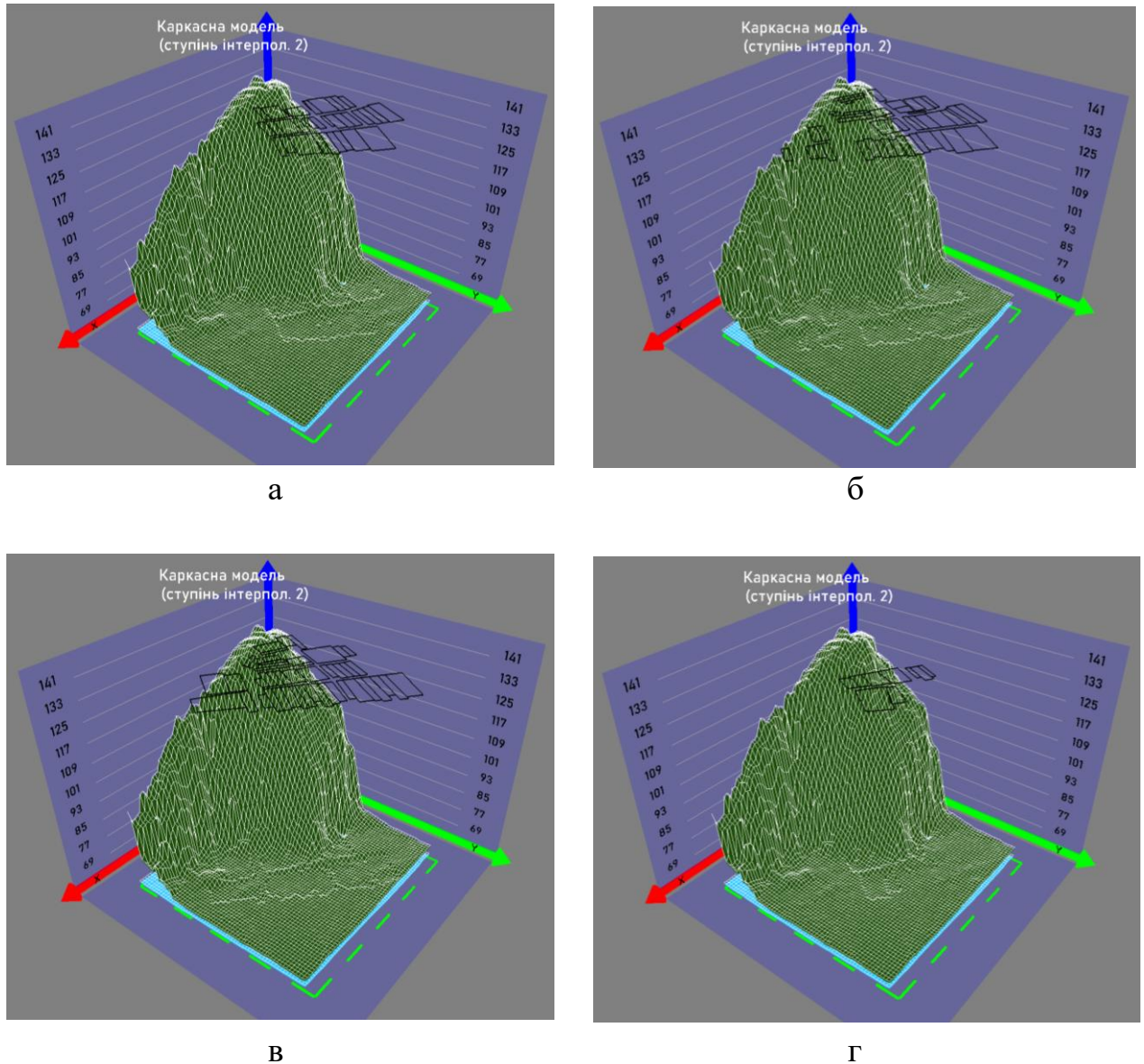


Рисунок 4.37 – Відображення контурів на площині «Каркасної моделі»
(ступінь інтерполяції 2)

Цих даних достатньо для побудови зміненої поверхні. Далі за допомогою контекстного меню слід вибрати функцію «Земна поверхня після осідання». Результат зміни поверхні відображено на рис. 4.38.



а – після підробки пласта С4; б – після підробки пласта С5;
в – після підробки пласта С6; г – після підробки пласта С8

Рисунок 4.38 – Зміна земної поверхні на «Каркасної моделі»
(ступінь інтерполяції 2):

У результаті підробки 4-х пластів отримаємо загальну зміненою земну поверхню (рис. 4.39).

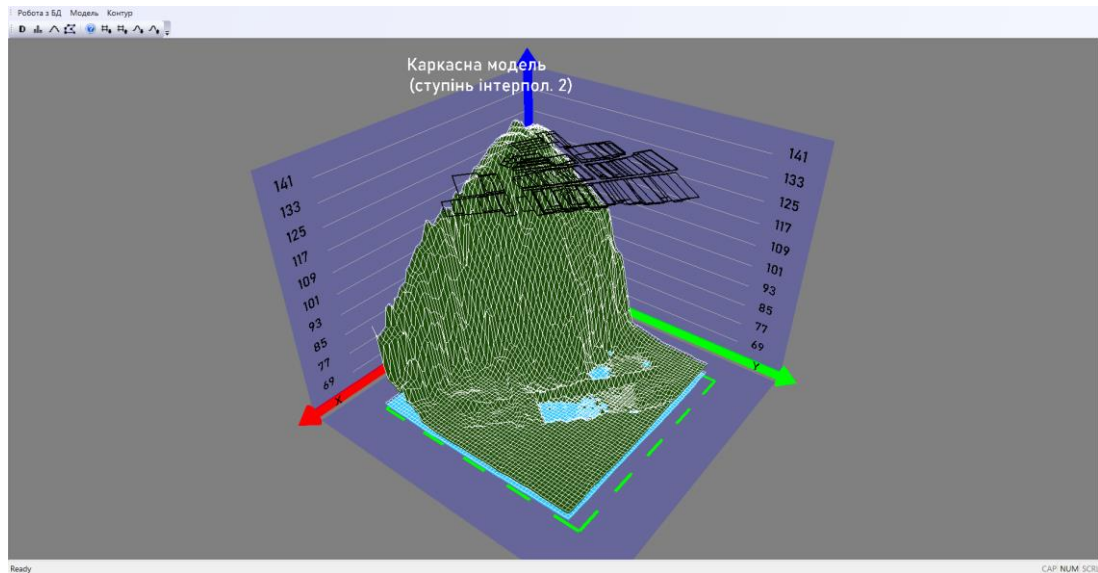


Рисунок 4.39 – «Каркасна модель» підробленої поверхні після відробки 4-х пластів (ступінь інтерполяції 2)

На останній моделі дуже добре видно, що при відпрацюванні 4-х пластів відображається не тільки підроблена поверхня, яка містить складні гідро-екологічні ризики, а й затоплені її ділянки.

Вся інформація щодо змін поверхні виводиться у контекстному вікні, яке представлено на рис. 4.40.

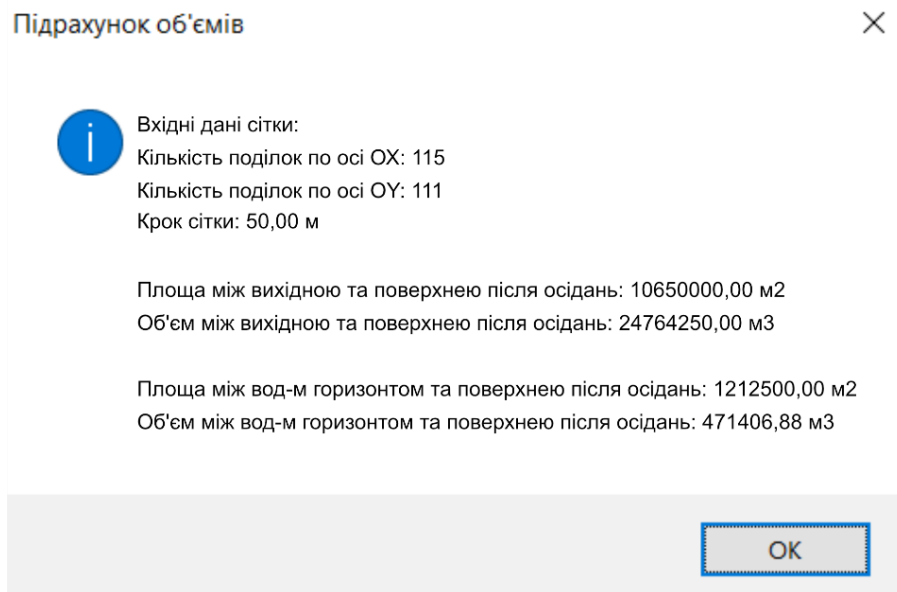


Рисунок 4.40 – Підрахунок площі та об'ємів зміненої поверхні

Необхідно співставити об'єми та площі зміни масиву і поверхні, згідно табл. 4.3.

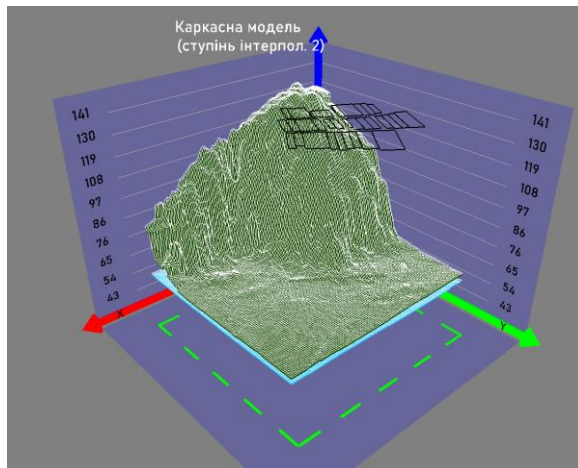
Таблиця 4.3 – Площі та об'єми змінених масиву і поверхні при відпрацюванні пластів С4, С5, С6, С8 шахтою «Тернівська»

Показник	Пласт С4	Пласт С5	Пласт С6	Пласт С8	Усі пласти разом
Площа між вихідною та поверхнею після осідання, км ²	6,10	7,23	9,22	1,01	10,65
Об'єм між вихідною та поверхнею після осідання, км ³	0,0064	0,0075	0,0097	0,001	0,0247

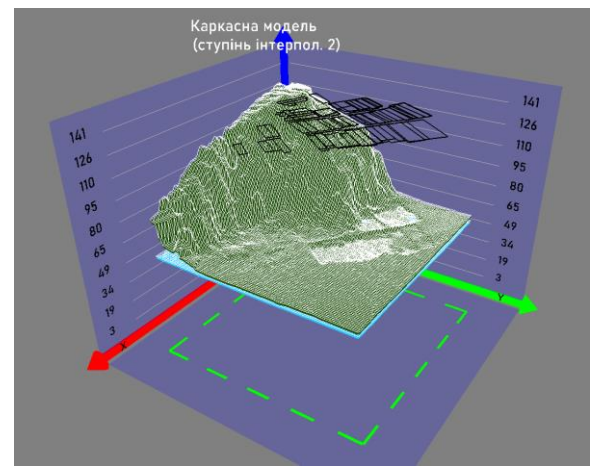
З таблиці 4.3 видно, що площа та об'єм масиву між вихідною та поверхнею після осідань змінюється залежно від параметрів пласта. У той же час, об'єм між водоносним горизонтом та поверхнею після осідання відсутній при вийманні одного пласта (відсутній перетин зміненої поверхні з рівневою поверхнею водоносного горизонту).

4.5.3 Динаміка зміни площ та об'єму затоплення при поступовому відпрацюванні вугільних пластів

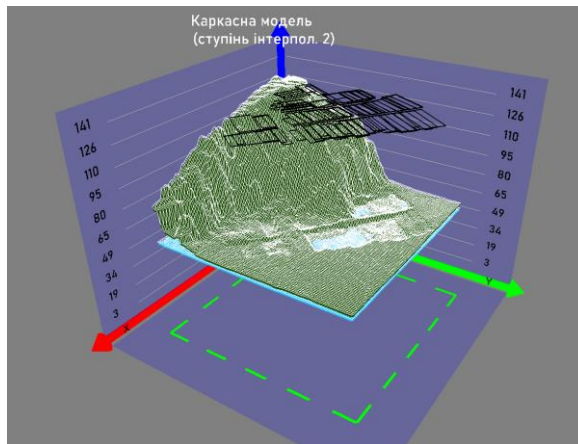
З використанням розробленої програми слід проаналізувати результати зміни об'єму масиву між поверхнями при поступовому відпрацюванні вугільних пластів та зміни цих поверхонь візуально завдяки вбудованому відтворювачу моделей (рис. 4.41).



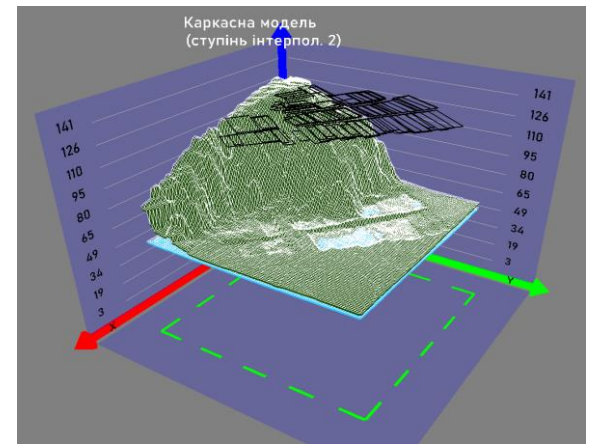
а



б



в



г

Рисунок 4.41 – Динаміка змін «Каркасної моделі» поверхні шахтного поля при послідовному вийманні 4-х пластів (ступінь інтерполяції 2)

Результати аналізу наведено в табл. 4.4.

На рис. 4.42 – 4.43 наведено зміни площі та об'єму масиву між вихідною та поверхнею після осідання при послідовному вийманні пластів. Обидва графіки описуються логарифмічною функцією. При цьому площа змінюється в 1,74 рази, а об'єм – 38 раз. Максимальна площа між вихідною і поверхнею після осідання становить $10,65 \text{ км}^2$, а об'єм – $0,0247 \text{ км}^3$.

Динаміка зміни об'ємів затоплення масиву і поверхні при підробці декількох пластів, які розраховані у розробленому ПЗ, зображена на рис. 4.44 та 4.45. Цей графік описується поліноміальною функцією 3-го ступеня.

Таблиця 4.4 – Результати сукупного аналізу площі та об'ємів змінених поверхні та масиву при відпрацюванні пластів С4, С5, С6, С8 шахти «Тернівська»

Показник	Пласт С4	Пласт С4, С5	Пласт С4, С5, С6	Усі пласти разом (С4, С5, С6, С8)
Площа між вихідною та поверхнею після осідання, км ²	6,10	8,28	10,63	10,65
Об'єм між вихідною та поверхнею після осідання, км ³	0,0064	0,014	0,0237	0,0247
Площа між водоносним горизонтом та поверхнею після осідання, км ²	–	0,0575	1,15	1,21
Об'єм між водоносним горизонтом та поверхнею після осідання, км ³	–	0,00002	0,00044	0,00047

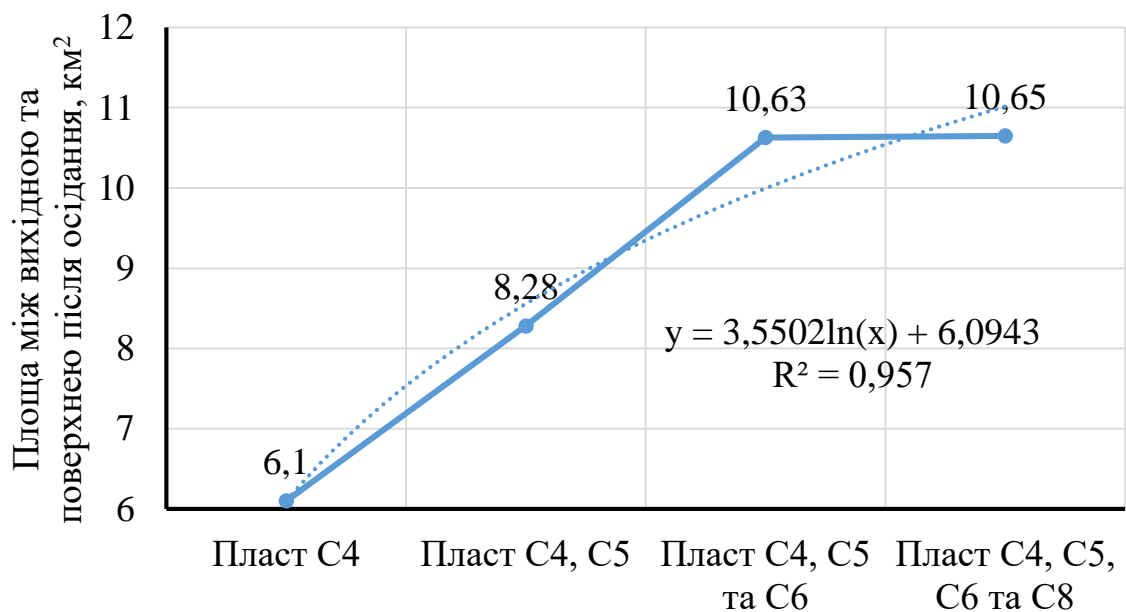


Рисунок 4.42 – Динаміка зміни площі між вихідною та поверхнею після осідання при відробці декількох пластів за моделюванням у розробленому ПЗ за зміненою площею

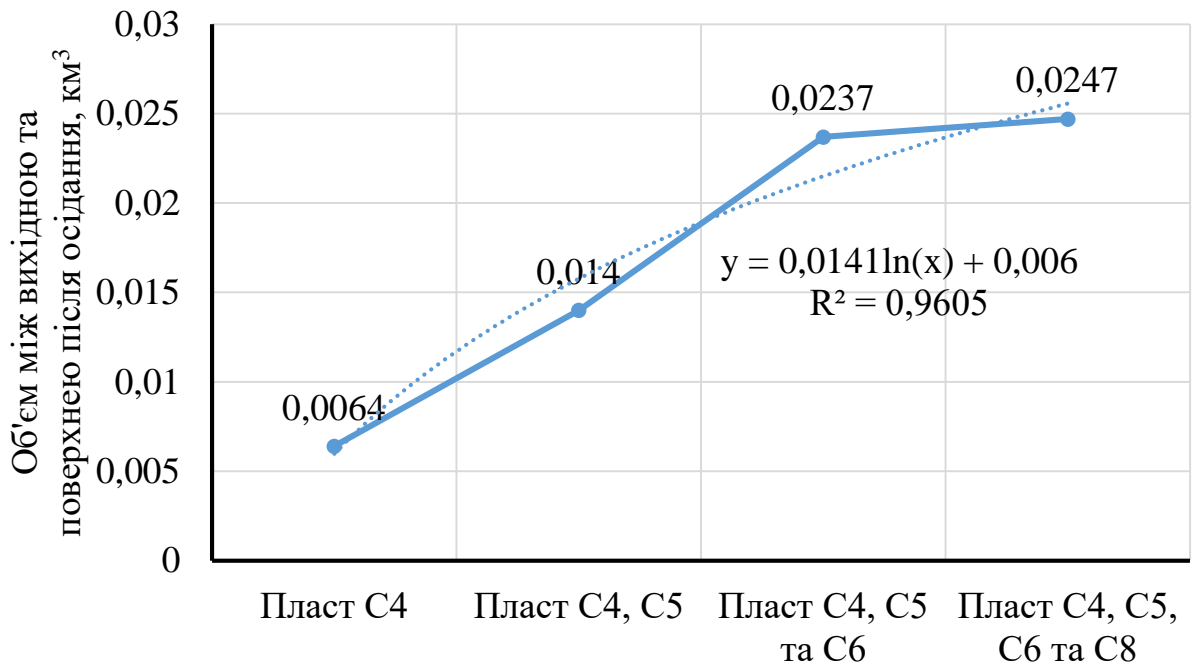


Рисунок 4.43 – Динаміка зміни об'єму між вихідною та поверхнею після осідання при відробці декількох пластів за моделюванням у розробленому ПЗ за зміною об'ємів масиву, що порушується

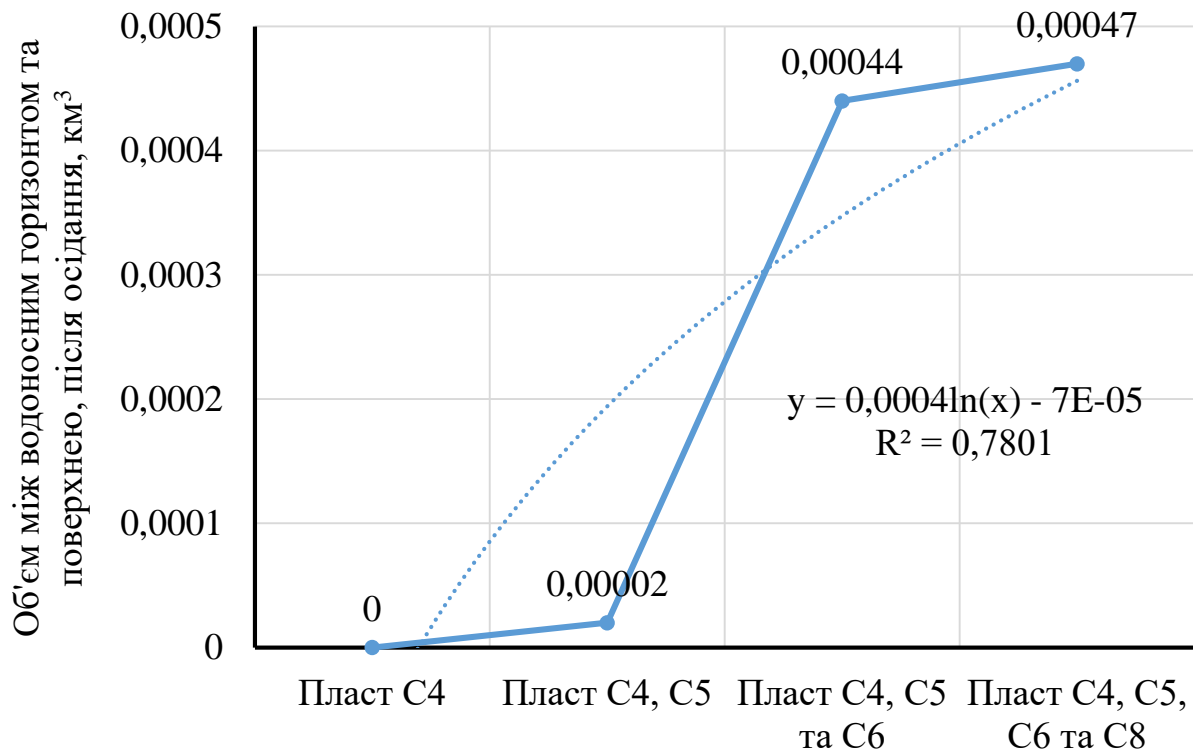
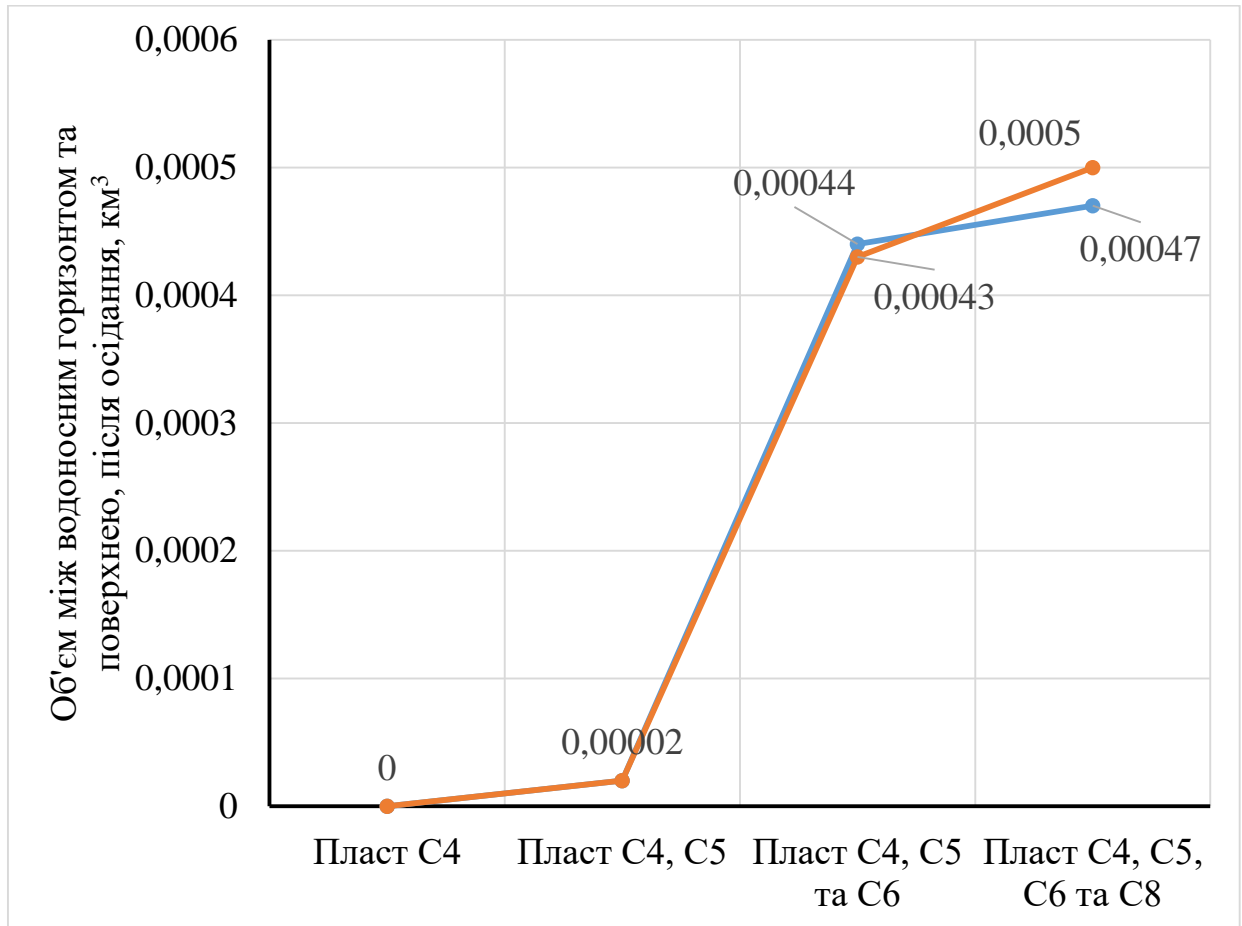


Рисунок 4.44 – Динаміка зміни об'ємів між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають при вийманні декількох пластів за моделюванням у розробленому ПЗ

На рис. 4.45 наведена динаміка зміни об'ємів між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають при вийманні декількох пластів за моделюванням у розробленому ПЗ та за маркшейдерськими вимірами і розрахунками .



- результати побудови у розробленому ПЗ;
- результати за маркшейдерськими вимірами і розрахунками

Рисунок 4.45 – Співставлення динаміки зміни об'ємів між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають при вийманні декількох пластів

Розбіжність результатів зміни об'ємів затоплення масиву за маркшейдерськими вимірами і моделюванням за розробленим ПЗ складає не більше 6%.

Висновки за розділом

1. За результатами досліджень у 4-му розділі обґрунтовано методіку моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами на шахтах Західного Донбасу і запропоновано математичну модель побудови поверхонь з регулярною мережею – інтерполяційною і поліноміальною, що дозволяють отримати адекватне уявлення поверхонь, а також є базисом для підрахунку об'ємів, представлених у вигляді суми елементарних призм по кожному вузлу мережі. Просторова інтерполяція точкових даних ґрунтується на виборі аналітичної моделі поверхні, а у зв'язку з неможливістю опису усієї поверхні однією функцією для просторової інтерполяції поверхонь з регулярним розміщенням опорних точок задіяно методи локальної інтерполяції. При цьому для визначення значення показника у вузлі використовується не вся сукупність наявних даних, а тільки виміри, що знаходяться навколо цієї точки.

2. Розроблене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процеси прогнозування і прийняття рішень щодо мінімізації гідроекологічних ризиків при синхронізації вуглевидобутку і закритті шахт Західного Донбасу.

3. Програмне забезпечення моделювання поверхонь виконано на мові Visual C++2015 під операційну систему Windows з використанням інструментальних засобів відкритої графічної бібліотеки OpenGL.

4. Розроблено, графічний інтерфейс, що враховує аналіз поведінки цільового користувача й останні тенденції в сфері User Experience.

5. Програмне забезпечення дозволяє:

– спростити задачу збору, зберігання й обробки даних за допомогою розробленої БД свердловин;

– розрахувати площу поверхні й об'єм масиву між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають у різні періоди, за допомогою розробленого модуля «Калькулятор осідання».

6. За допомогою розробленого програмного забезпечення встановлено залежності зміни площі між початковою поверхнею, та що осіла і об'єму між

рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають, при послідовному виїмманні вугільних пластів на шахті «Тернівська», які описуються логарифмічною функцією. При цьому площа змінюється в 1,74 рази, а об'єм – у 38 раз. Максимальна площа між вихідною й поверхнею, що осіла становить $10,65 \text{ км}^2$, а об'єм між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають – $0,0247 \text{ км}^3$.

7. Розбіжність результатів зміни об'ємів затоплення масиву за маркшейдерськими вимірами і моделюванням складає не більше 6%, що свідчить про високу достовірність тривимірної геодинамічної та чисельної моделі, яка реалізована за допомогою розробленого програмного забезпечення.

8. Результати досліджень за матеріалами четвертого розділу опубліковано у роботах [2], [40], [87] – [92], [97], [114] – [115].

РОЗДІЛ 5

РЕАЛІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ОБГРУНТОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ЯК ІНСТРУМЕНТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ ГІДРОЕКОБЕЗПЕКОЮ ВУГЛЕДОБУТКУ І ЗГОРТАННЯ ГІРНИЧИХ РОБІТ

Даний розділ є органічним продовженням розробки і реалізації програмного забезпечення, обґрунтованого у попередніх розділах і поєднує модель осідання земної поверхні з моделями, що відображають фізичну сутність перетворень породного масиву над виробленим простором.

5.1 Фільтраційна комп'ютерна модель шахтних полів

Найбільші складнощі виникають при обґрунтуванні меж розрахункових шарів у розрізі кам'яновугільної товщі. Ця товща при нахилі на північ і північний захід під кутом $2 - 5^\circ$ розбита значною кількістю поперечних та діагональних скидів, і до одного розрахункового шару попадають різні за віком відклади. Для обґрунтування кількості розрахункових шарів і контурів їх виходу під бучацькі та тріасові відклади, а також для визначення абсолютних відміток їх покрівлі та підшви було вивчено і проаналізовано регіональні геологічні розрізи, карти гіпсометрії робочих вугільних пластів, плани гірничих робіт по 11 шахтах, карта виходу вугільних пластів і вапняків під покривні нашарування, що залягають вище.

У водоносній товщі кам'яновугільних відкладів та кристалічних порід було виділено 11 розрахункових шарів. На фрагментах розрахункової схеми (рис. 5.1) видно як вугільні пласти у розрахункових шарах переходять один у другий.

Зовнішні межі моделі. На заході межа моделі збігається з межею Західно-Павлоградського району і проходить уздовж лінії селищ Меліоратив-

не, Всесвятське (на річці Самара) і Попасне. На сході вона збігається з межею Красноармійського вугленосного району і проходить уздовж лінії – селище Іванівка, ст. Межова і селище Калініно.

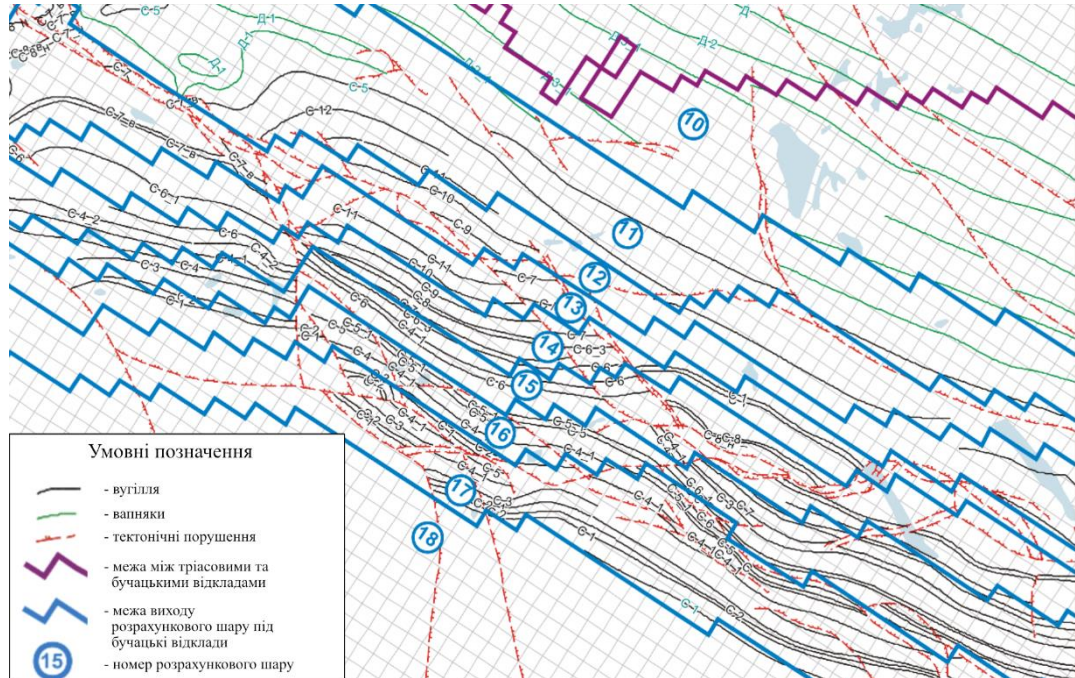


Рисунок 5.1 – Апроксимовані межі та площі виходу розрахункових шарів під покривні відклади (розрахункові шари покривних відкладень 1 – 9 розташовані погоризонтно)

На півночі межу обрано за межами перспективних вугленосних ділянок Павлоградсько-Петропавлівського та Західно-Павлоградського районів уздовж лінії – верхів'я річки В'язівок, селище Варварівка (на р. Тернівка) і селище Слав'янка (на р. Бик). На півдні межа визначена контуром виклинювання кам'яновугільних, бучацьких і київських відкладів по виходах кристалічних порід архею на поверхню чи під харківські шари уздовж лінії – с. Майське, с. Воскресінцівка (на р. Вовча) і с. Гаврилівка (на р. Кам'янка). На зовнішніх межах задаються умови 2-го ($Q = 0$ – за лінією водотоку) і 3-го роду (приплив, перетікання, відтік підземних вод до розрахункових шарів, взаємозв'язок підземних вод з поверхневими водами).

Внутрішні межі на епігнозний період – поверхневі водотоки, інфільтраційне живлення, шахти і водозабори, що експлуатуються, і на прогнозний період, що дозволяє передбачити вуглевидобуток на перспективних ділянках та розвідані водозабори. Внутрішні межі відображаються умовами 2-го ($Q = \text{const}$ – інфільтрація атмосферних опадів, техногенні витоки і водозабори) і 3-го роду (взаємозв'язок підземних вод з поверхневими водами і гірничими виробками).

Зовнішні контури розрахункових шарів не співпадають між собою, але в програмному комплексі «MODFLOW», на базі якого створена модель, обґрунтовано не передбачені можливості виклинювання шарів, і тому розрахункові шари умовно розповсюджені в межах всієї області фільтрації, з подальшим нівелюванням відхилень імітаційним моделюванням.

Потужність кожного розрахункового шару моделі на площі їх розповсюдження дорівнювала приблизно 0,2 м, а в межах ділянок з нерівностями підосви тріасових і бучацьких відкладів її значення сягало 0,5 м. До складу розрахункових шарів, починаючи з 12, входять і кристалічні породи, але тільки у 20-му шарі вони мають переважне поширення.

Відповідно до вимог програмного забезпечення модель представлена масивами вихідної інформації (табл. 5.1).

Для створення цих масивів були використані: карта гіпсометрії поверхні землі, геоморфологічна карта, абсолютні відмітки поверхневих вод, відомості про глибину залягання рівнів ґрунтових вод, гідрогеологічні розрізи, дані про фільтраційні параметри порід з урахуванням анізотропних особливостей порід, абсолютні відмітки про покрівлю і підосву розрахункових шарів, відомості про водовідбір на водозаборах та з поодиноких свердловин, плани ведення гірничих робіт, абсолютні відмітки горизонтів ведення гірничих робіт, водопріплив до шахт і горизонтів, відомості про режимні спостереження рівнів підземних вод.

Рішення задач виконується для стаціонарних і нестаціонарних умов. Період 1952 – 1955 рр. визначено наближеним до періоду зі стаціонарним

режимом, оскільки для водопостачання використовували поодинокі свердловини, а централізовані водозабори були відсутні. Період розв'язання оберненої нестационарної задачі 1955 – 2007 рр. за аналізом водовідбору, режимних спостережень за рівнями підземних вод, часу введення шахт до експлуатації розподілено на вісім часових інтервалів, в межах яких граничні умови прийняті як постійні.

Таблиця 5.1 – Перелік масивів вихідної інформації, що надано при створенні моделі

№ з/п	Масиви вихідної інформації по кожному розрахунковому шару
1	Геометрія області моделювання
2	Межі 2-го роду по зовнішніх контурах водоносних горизонтів
3 – 5	Межі 3-го роду по зовнішніх контурах водоносних горизонтів (задаються абсолютні відмітки рівнів, водопровідність водоносних горизонтів)
6	Дебіт водозаборів і поодиноких свердловин
7 – 12	Поверхневі водотоки (задаються масивами: абсолютні відмітки рівня, підшви підруслових відкладів, їх коефіцієнт фільтрації)
13	Абсолютні відмітки підшви розрахункових шарів
14	Інфільтрація разом з техногенною
15	Абсолютні відмітки поверхні землі
16	Початковий рівень підземних вод
17	Коефіцієнти фільтрації порід
18	Гравітаційна та пружна водовіддача
19	Випаровування з поверхні землі та критична глибина випаровування
20	Активна й загальна пористість водовмісних порід

Породи по зонах тектонічних порушень у більшості випадків мають незначну водонасиченість, оскільки тріщини заповнені глинистим матеріалом, який має низькі коефіцієнти фільтрації [116]. Зв'язок підземних вод між суміжними ділянками по зонах тектонічних порушень переважно затруднений, про що свідчить досвід експлуатації шахт [117], [118].

На деяких ділянках зони тектонічних порушень представлені великоуламковим матеріалом, для якого характерні підвищені значення коефіцієнтів фільтрації, у т.ч. і за глибиною. Так, наприклад, питомий дебіт по свердловинах № 3939 (шахта «Степова») і № 4026 (середня частина б. «Перша Лозова») у зонах тектонічних порушень сягав 0,17 л/с, а коефіцієнт фільтрації складав 0,8 м/добу [116].

Масив гравітаційної водовіддачі та пружної ємності сформовано за даними [119], відомостями про потужність водоносних горизонтів та поділяючих шарів. Початкові дані наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Початкове значення гравітаційної ємності та пружної ємності по розрахункових шарах

Розрахунковий шар	Гравітаційна ємність	Пружна ємність
1	0,2	0,001
2	0,05	0,000025 – 0,0005
3	0,1 – 0,2	0,000025 – 0,0005
4	0,0002 – 0,2	0,0002 – 0,00003
5	0,2	0,00001 – 0,000003
6	0,01	0,0000008 – 0,00001
7	0,2	0,0000008 – 0,00005
8	0,01	0,000001 – 0,00001
9	0,002	0,0000008 – 0,00001
10 – 20	0,001	0,0000008 – 0,00001

Масив взаємозв'язку підземних вод з поверхневими на моделі відтворюється завданням абсолютних відміток рівнів води, абсолютних відміток підосви підруслових відкладів та параметром взаємозв'язку підземних вод з поверхневими.

Для визначення абсолютних відміток води на річках Самара, Вовча, їх притоках, у водоймах використовували топографічні карти М 1:200 000, дані по водопостах, розрізах, подовжніх профілях річок Самара й Вовча.

Абсолютні відмітки підошви підруслових відкладів прийнято на 1 – 3 м нижче за абсолютні відмітки рівня води в річках (цей параметр не має вирішального значення).

Параметри взаємозв'язку підземних вод з поверхневими розраховані за формулами:

– для лінійного водотоку

$$DL = \frac{TS \cdot N}{L + \Delta L}, \quad (5.1)$$

– для площадної водойми

$$DL = \frac{k_0 F_B}{m_0}, \quad (5.2)$$

де k_0 – коефіцієнт фільтрації, м/добу;

m_0 – потужність слабопроникного шару, м;

TS – водопровідність, м²/добу;

N – одинична ширина потоку, м;

L – відстань від центру розрахункового блоку до водотоку, м;

ΔL – недосконалість русла водотоку, м;

F_B – площа водойми у блоці моделі, м².

Значення розрахованих параметрів взаємозв'язку підземних вод, становили для річок: Самара – 200 м²/добу, Вовча – 100 м²/добу; м. Тернівка – 100 м²/добу; в. Тернівка – 150 м²/добу.

Початковими умовами прийнято рівні підземних вод на доексплуатаційний період [120].

Водовідбір підземних вод на моделі було задано граничною умовою 2-го роду. Найбільший водовідбір припадає на період 1975 – 1987 рр., найменший – 1988 – 2005 рр.

За результатами рішення стаціонарної оберненої задачі рівні ґрунтових вод відображені на рис. 5.2. Збіжність результатів моделювання і фактичних даних наведено на рис. 5.3.

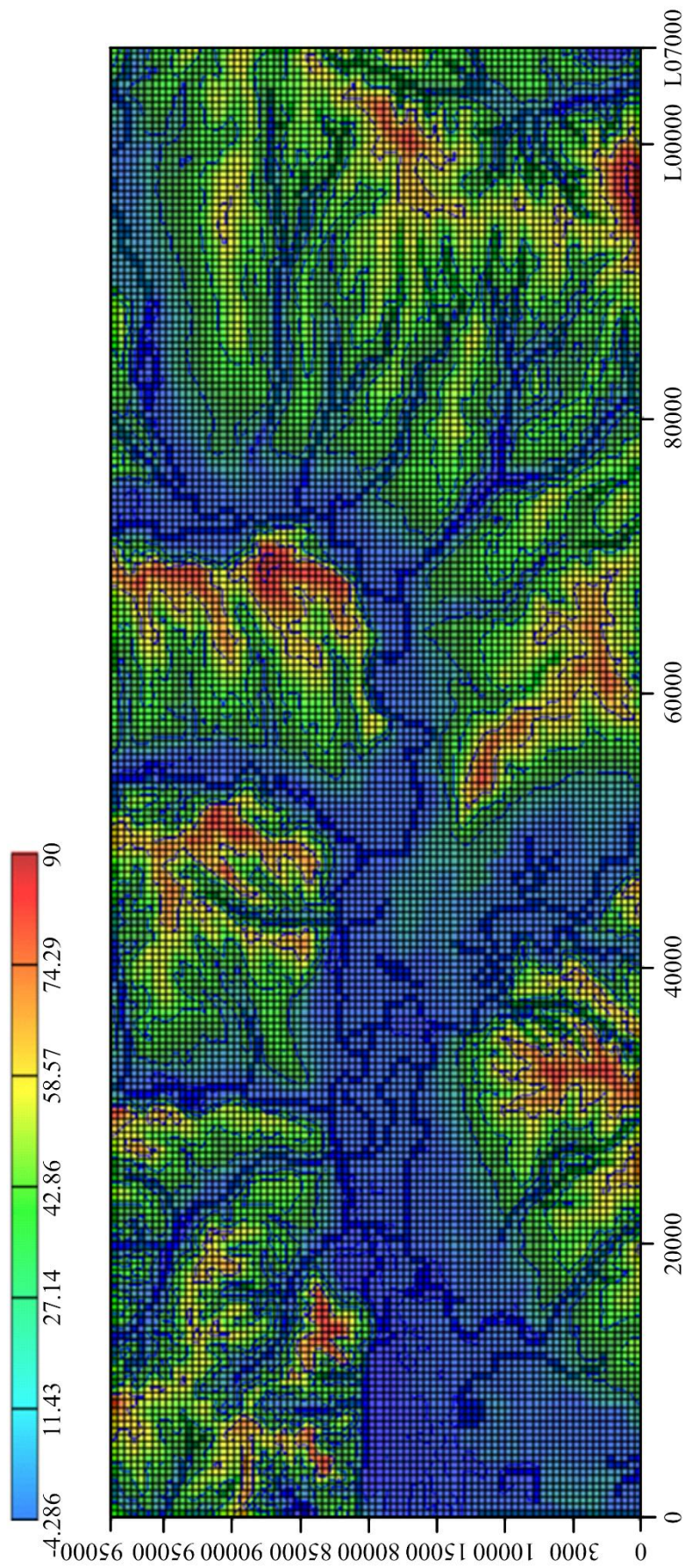
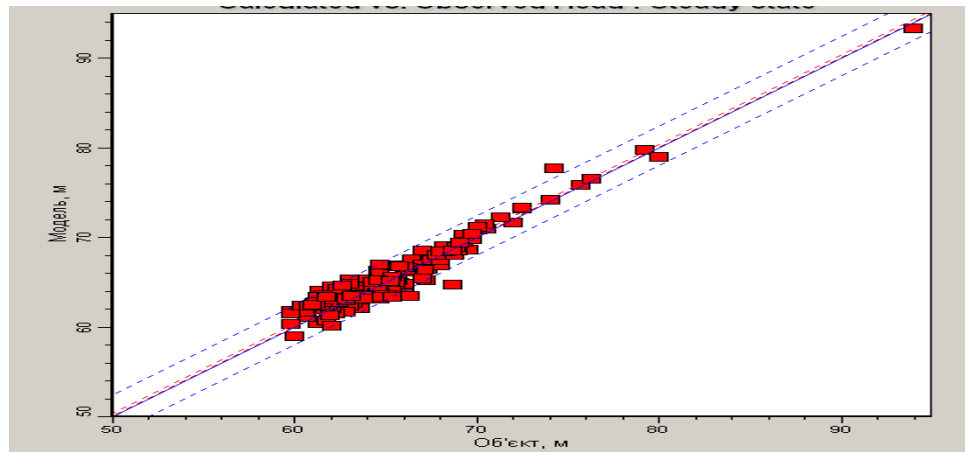
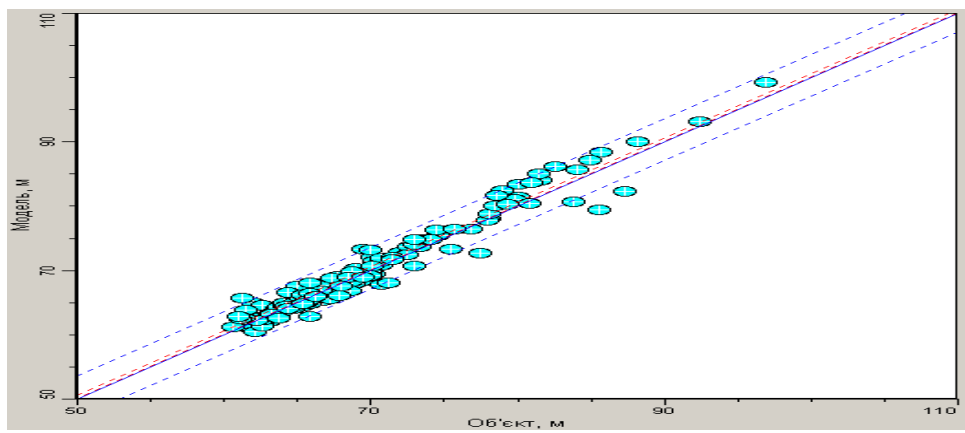


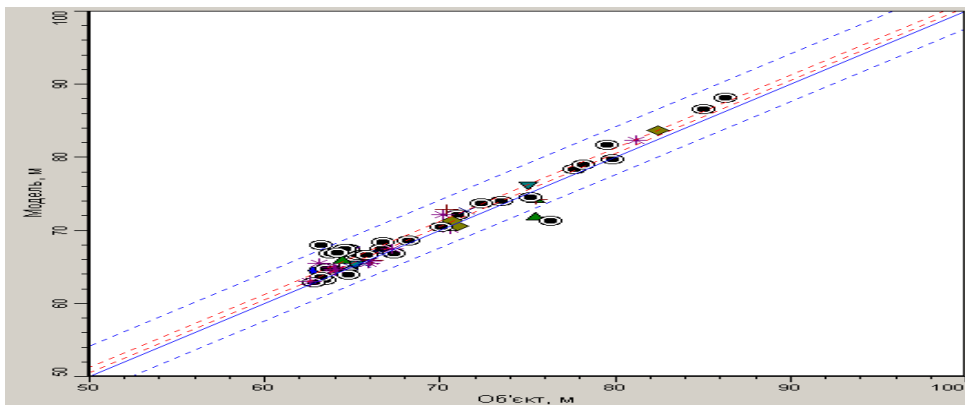
Рисунок 5.2 – Глибина залягання рівня ґрунтових вод на доексплуатаційний період



а



б



в

а – ґрунтовий водоносний шар; б – бучацькі відклади;
в – кам'яновугільні відклади

Рисунок 5.3 – Графіки збіжності рівнів підземних вод на моделі й об'єкті на доексплуатаційний період

Балансові складові підземних вод за результатами вирішення епігнозної стаціонарної задачі на доексплуатаційний період свідчать, що основну роль у живленні ґрунтових вод (1-й розрахунковий шар) відіграють інфільтрація атмосферних опадів й техногенне живлення (61 %) та перетік з водоносного горизонту харківських відкладів (32 %), основні витратні статті балансу – випаровування, височування й транспірація (36 %) та розвантаження у поверхневі водотоки (29 %) (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Загальні балансові складові ґрунтових вод (1955 р.)

Стаття балансу підземних вод	Прибуткові		Витратні	
	м ³ /добу	%	м ³ /добу	%
Взаємозв'язок поверхневих вод з підземними водами	17942,0	4,0	129380,0	29,0
Витрати на зовнішніх границях моделі	12 431,0	3,0	7990,0	2,0
Інфільтрація атмосферних опадів й техногенне живлення	275860,0	61,0	0	0
Перетік через підшову	145410,0	32,0	140130,0	31,0
Ємнісна складова підземних вод	0,4	0	6,3	1,0
Випаровування, височування й транспірація	0	0	169740,0	36,0
Дебіт свердловин (розподілений водовідбір)	0	0	4400,0	1,0
Усього	451 643,4	100,0	451646,3	100,0

У живленні підземних вод бучацьких відкладів основну роль відіграє водообмін з водоносним горизонтом київських відкладів (+54,3 %) та (– 67,2 %), другорядну – з водоносними горизонтами кам'яновугільних та тріасових відкладів.

Нестаціонарну задачу розв'язували на період 1955 – 2007 рр., в межах яких граничні умови прийнято постійними.

Розподіл водопритливу до горизонтів гірничих робіт при вирішенні кожного етапу моделювання виконували відносно фактичних даних. По шахтах, що відпрацьовують вугільні шари відкритого типу («Степова», «Першотравнева», «Ювілейна», ім. М.І. Сташкова), максимальний водовідлив зосереджувався в блоках поблизу виходу вугільних шарів під водонасичені бучацькі піски.

По шахтах з вугільними шарами закритого типу існуючий водовідлив розподілявся у блоках моделі з гірничо-капітальними та видобувними виробками рівномірно, і цього було достатньо для отримання ідентифікації моделі та реального об'єкта.

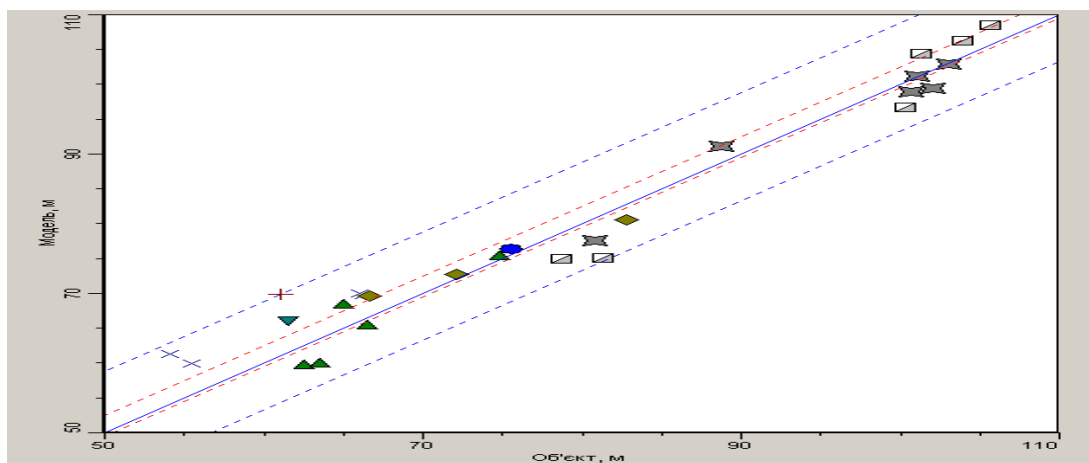
На моделі відтворювали також роботу водозаборів. Завдяки можливостям програмного забезпечення зміни водовідбору вносили й упродовж кожного виділеного інтервалу часу (етапу). Приклад результатів моделювання наведено на рис. 5.4 та табл. 5.4.

До 2005 року зниження підземних вод ґрунтового водоносного горизонту відбулося до 5 м на ділянках шахт «Благодатна», «Павлоградська»; до 3 м – на ділянці шахти «Тернівська»; до 15 м – на ділянці шахт ім. М.І. Сташкова та «Степова», «Першотравнева», «Ювілейна».

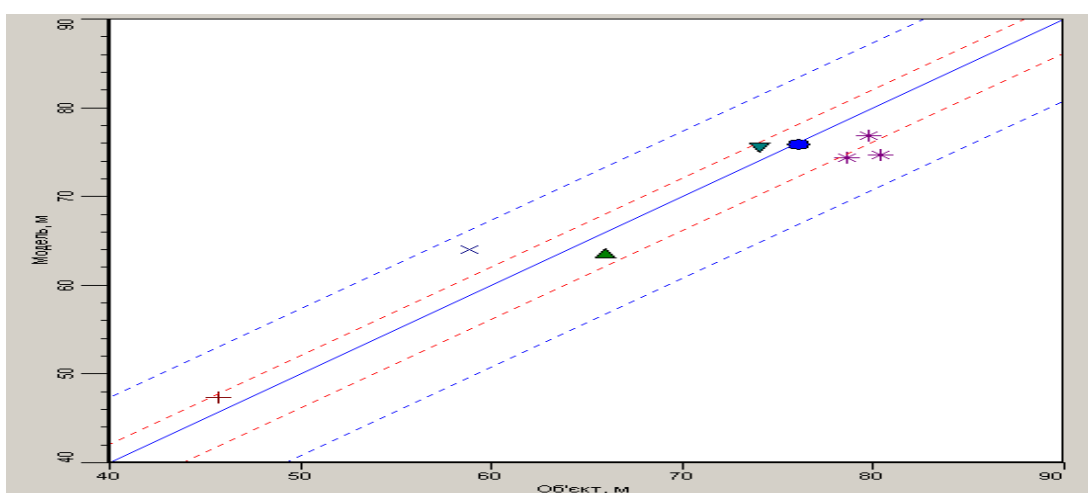
На Павлоградських водозаборах депресійна воронка зовсім зникла, а на ділянці Межівського водозабору її глибина зменшилася до 5 м (див. рис. 5.5).

Відбулося також збільшення перетоку з водоносного горизонту київських відкладів на 126 557 м³/добу та відтік у водоносний горизонт карбонових відкладів на 119 449 м³/добу.

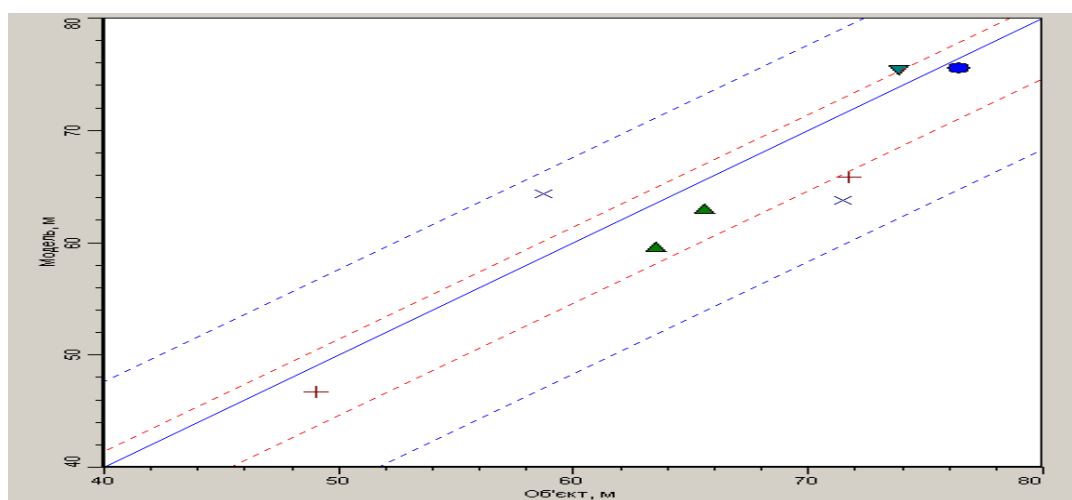
Показовим є порівняння складових балансу моделювання доексплуатаційного (стаціонарна задача) та експлуатаційного періодів (нестаціонарне рішення), що наведено у табл. 5.3 і 5.4. Ці параметри слід сприймати як вагомий критерій впливу інженерно-технічних заходів у досягненні гідроекобезпеки шахтних полів на різних етапах їх експлуатації та при згортанні гірничих робіт.



а



б



в

а – 1990 р.; б – 2000 р. ; в – 2005 р.

Рисунок 5.4 – Збіжність рівнів підземних вод 10 – 20-го розрахункових шарів на моделі й об'єкті (водоносні горизонти кам'яновугільних відкладів)

Таблиця 5.4 – Загальні балансові складові підземних вод
бучацьких відкладів (2005 р.)

Стаття балансу підземних вод	Прибуткові		Витратні	
	м ³ /добу	%	м ³ /добу	%
Витрати на зовнішніх межах моделі	11 479	4,6	7 214	2,8
Перетік через покрівлю та підшву	189 830 (київ)	76,0	63 273 (київ)	24,8
	12 395 (юра)	5,0	4 322 (юра)	1,7
	13 901 (карбон)	5,6	133 350 (карбон)	52,4
	11 558 (тріас)	4,6	31 735 (тріас)	12,5
	8 551 (харків)	3,4	2 034 (харків)	0,8
Ємнісна складова підземних вод	1 827	0,7	44	0
Дебіт свердловин	0	0	12 710	5,0
Витрати за стовбурами	0	0	66	0
Інфільтрація природних опадів й техногенних витоків	520	0,1	0	0
Усього	250061	100	254 748	100

Абсолютним результатом ефективності заходів є близькість балансових складових до тих, що визначені епігнозним моделюванням доексплуатаційного періоду.

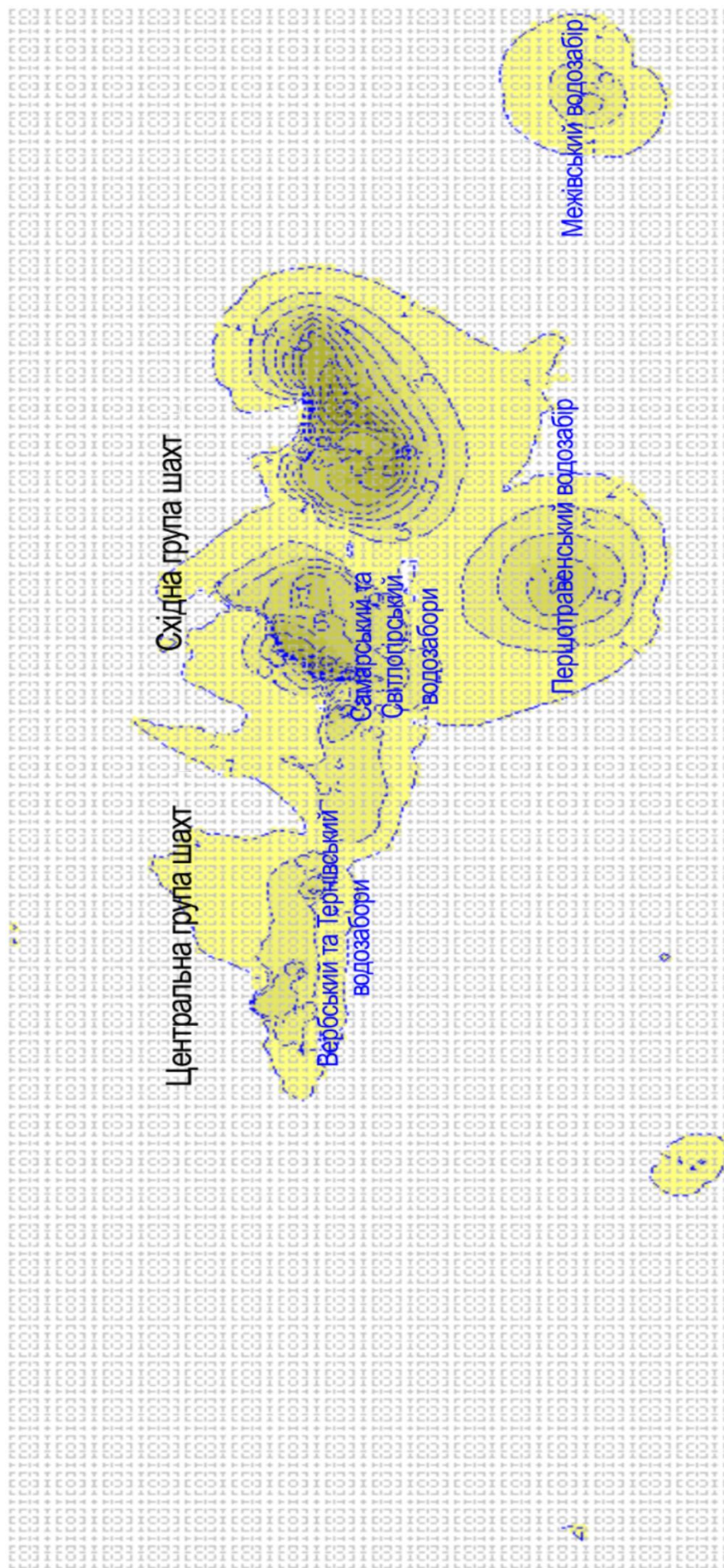


Рисунок 5.5 – Зниження рівня ґрунтових вод станом на 2005 р.

5.2 Комп'ютерна модель суміжних шахт, що готуються до закриття в режимі синхронізації гірничих робіт та їх згорання

5.2.1 Аналіз особливостей гідрогеологічних умов та природно-техногенного режиму шахтних полів

Провідним фактором у формуванні природної та техногенної гідродинамічної обстановки шахтних полів є геолого-структурний фактор. Відповідно, вугільні шари типізуються як «відкриті» та «закриті», що визначає величину шахтних водоприпливів.

Шахти «Степова» та «Ювілейна» належать до «напіввідкритого типу», де відпрацьовуються вугільні пласти як «закритого» типу, котрі не мають гідравлічного взаємозв'язку з обводненими покривними відкладами в межах шахтного поля, так і «відкриті» вугільні пласти, що мають гідравлічний взаємозв'язок з обводненими покривними відкладами в межах частини шахтного поля.

Гідродинамічно відкритими є бремсбергові частини шахтних полів (блок 1, верхній), що тектонічними порушеннями відокремлюються від «закритих» блоків 2 і 3 (середнього та нижнього). Підтвердженням основної ролі геологоструктурного фактору у формуванні обводнення шахтного поля є фактичні дані щодо величин водоприпливів у гірничі виробки шахтних полів (табл. 5.4), де максимальні припливи води зафіксовані в блоці 1.

Приплив води в гірничі виробки шахти «Степова» впродовж експлуатації змінювався від 215 м³/год до 1239 м³/год шахти «Ювілейна» – від десятків до 1053 м³/год.

Залучення до водовідливу шахт «Степова» та «Ювілейна» додаткових ресурсів підземних вод покривної товщі підтверджується невеликою мінералізацією шахтних вод 2,5 – 6,0 г/дм³ (шахта «Степова») та 2,0 – 3,7 г/дм³ (шахта «Ювілейна») в порівнянні з мінералізацією вод шахти «Дніпровська» (до 19 г/дм³), що є гідродинамічно «закритою».

Таблиця 5.4 – Формування водоприпливів в межах блоків шахтних полів (2020 р.)

Схема шахто-пластів	ш. «Степова»		ш. «Ювілейна»	
	горизонт, м	водоприплив, м ³ /год	горизонт, м	водоприплив, м ³ /год
Відкрита (блок 1, верхній)	145	499	210	668
Закрита (блок 2, середній)	210	152	250	270
	300	116		
Закрита (блок 3, нижній)	490	134	--	--
Загальний водоприплив по шахті, м ³ /год	901		938	

При відпрацюванні вугільних запасів з обваленням покрівлі очисних виробок на площі шахтного поля сформувались мульди зрушення на поверхні землі, в тому числі в заплаві річки Самара з величинами осідань до 1,44 м.

Шахта «Степова» має спільні межі на північному заході з працюючою шахтою «Дніпровська» та на південному заході з шахтою ім. М.І. Сташкова, що з червня 2021 року в стадії затоплення та ліквідації. На півдні межує з закритою у 2005 році шахтою «Першетравнева». Шахта «Ювілейна» має спільну межу на заході з шахтою «Степова» на півдні з шахтою «Першетравнева» (рис. 5.6).

При цьому природними межами шахтних полів є розривні тектонічні порушення, що в умовах Західного Донбасу виконують роль водонепроникних екранів. Це підтверджується даними фондових матеріалів [121], [122] та досвідом розкриття тектонічних порушень на шахті «Самарська» [123], [124], шахтах «Павлоградська» та ім. М.І. Сташкова.

За результатами аналізу та систематизації даних [121], [122] встановлено, що на території Західного Донбасу зафіксовано 346 точок перетину свердловинами зон тектонічних порушень і 356 випадків їх розкриття гірничими виробками вугільних шахт.

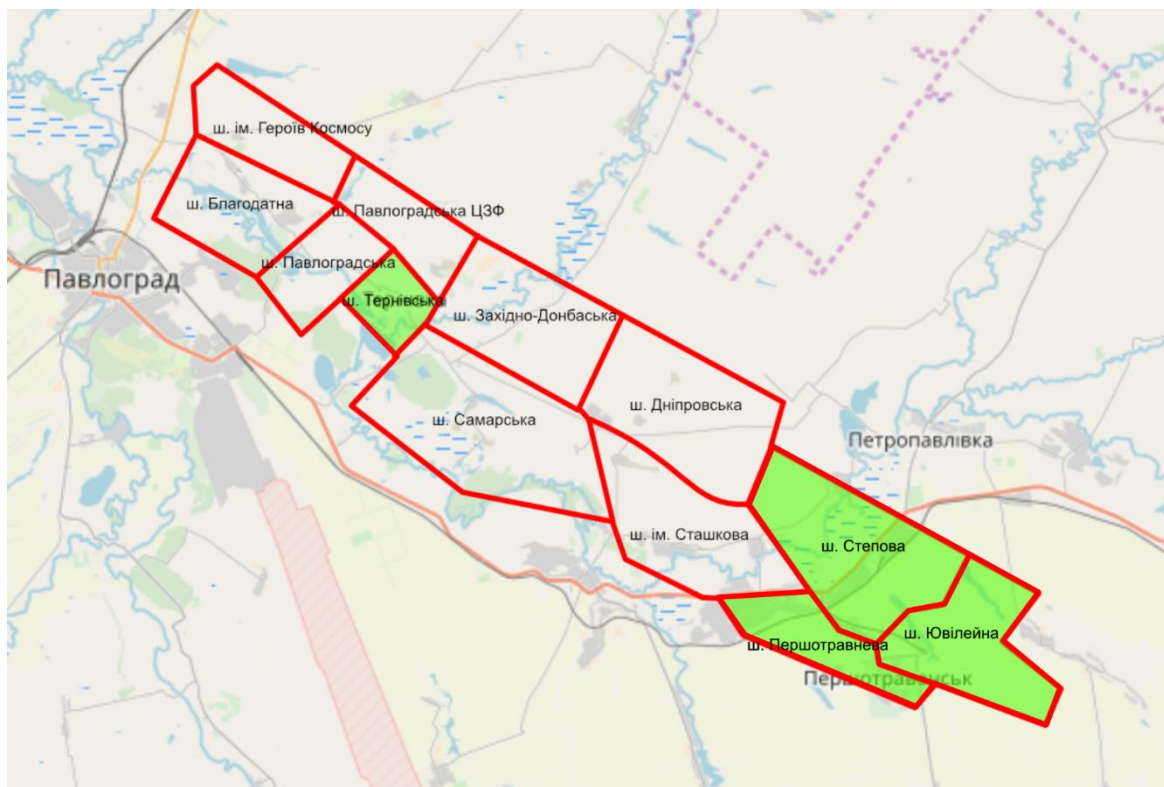


Рисунок 5.6 – План шахтних полів на родовищі вугілля Західного Донбасу

У більшості випадків при перетині тектонічно порушених порід не спостерігалось значних водопроявів, тобто породи були не обводнені. Рідше спостерігалися «зволожені породи», «капіж», «струмки», «пластове просочування». У згаданому звіті наведено дані про спеціальні гідродинамічні випробування Богданівського скиду між шахтами «Благодатна» та «Героїв Космосу», де підтверджено, що скид є водотривом.

У роботах [123] – [124] цей висновок обґрунтований чисельним моделюванням і натурними даними на шахті «Самарська». Відомі також факти успішного перетину Південно-Тернівського та Повздожнього скидів капітальними виробками шахт «Павлоградська» та ім. М.І. Сташкова.

Міжшахтні бар'єрні цілики та цілики між межею безпечного ведення гірничих робіт під пливунами (бучацький водоносний горизонт) в бремсбергових частинах шахтних полів гідродинамічно відкритого типу за даними

маршкшейдерського підрозділу ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» мають нормативні розміри.

При моделюванні водопроникність означених ціликів врахована при ідентифікації об'єкта імітаційним завданням водопровідності, тобто врахована при оцінці точності моделювання.

Необхідно відзначити, що нормативні параметри бар'єрних ціликів у багатьох дослідженнях відзначаються як завищені щодо реальних гідродинамічних навантажень, наприклад [125].

За даними геолого-маркшейдерської служби гідравлічний зв'язок між гірничими виробками шахт відсутній.

Взаємний гідродинамічний вплив суміжних шахт «Степова» – «Першотравнева» та «Ювілейна» – «Першотравнева» проявляється у вигляді планової фільтрації по відкладеннях мезокайнозою. Про це свідчить формування воронки депресії на полі шахти «Першотравнева» в зоні виходу пластів S_6 та S_6^1 , що відпрацьовують шахтою «Степова».

Взаємозв'язок через покривну товщу між шахтними полями «Степова» – ім. М.І. Сташкова ускладнений наявністю між ними гідродинамічної границі, якою є р. Самара.

Отже, гідравлічний зв'язок в продуктивній товщі карбону між шахтними полями через зони розривних порушень (межі шахтних полів) практично відсутній. Про це свідчать і відсутність впливу затоплення шахти «Першотравнева» на гідродинамічну ситуацію шахт «Степова» та «Ювілейна».

Шахта «Першотравнева» є першою, яку ліквідували в Західному Донбасі методом повного затоплення. Гірничі роботи на шахті зупинені в 1999 р., а в 2003 р. припинено шахтний водовідлив.

Режимні спостереження на полі ліквідованої шахти ведуться по 11 свердловинах, обладнаних на весь комплекс водоносних горизонтів.

Аналіз режимних спостережень по свердловинах відомчої мережі (2004 – 2019 рр.) свідчить про те, що в результаті зупинки водовідливу та ліквідації шахти «Першотравнева» відновлення рівня води в кам'яновугільних

відкладах відбулося на 7,0 м (св. 6378); в бучацьких – на 11,15 м (св. 6772); в межигірських і олігоценових, відповідно, на 12,09 м (св. 14750) і 4,86 м (св. 6381). Проте повне відновлення стримується відпрацюванням пластів на шахті «Степова».

За фондовими матеріалами ШУ «Першотравенське» побудовано графіки відновлення рівня підземних вод у технічній свердловині при затопленні поля шахти «Першотравнева» рис. 5.7).

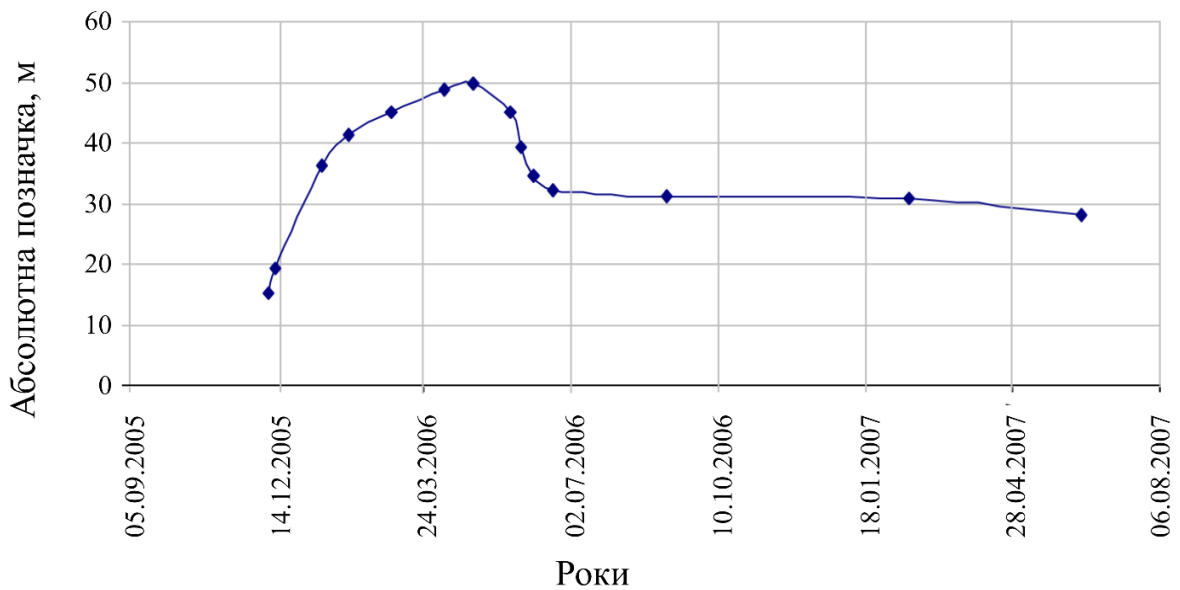


Рисунок 5.7 – Фактичні дані відновлення рівня підземних вод в технічній свердловині при затопленні шахти «Першотравнева»

Дані відновлення рівня в стовбурі не є показовими, бо фіксація підйому рівня велася одночасно із його засипкою.

Будь-які детальні технічні дані щодо вимірів у технічній свердловині відсутні. За цих умов можна зробити лише припущення у поясненні зафіксованого підйому та подальшого зниження рівня підземних вод, а саме:

- технічні помилки вимірів;
- локальне скупчення повітряно-газової суміші у тупикових ділянках погашених виробок бремсбергової частини шахтного поля та подальша її фільтрація через водотривку підшву бучацького горизонту з проявами ерліфтного ефекту у покривних відкладах та заміщенням водою, яка підтоп-

лює і витискає більш проникну повітряно-газову складову у карбоні зі зниженням рівня (механізм цього явища описаний у роботі [126]).

5.2.2 Обґрунтування розрахункової гідродинамічної схеми

Оцінка гідродинамічного режиму в межах полів шахт «Степова» і «Ювілейна» та прогноз його змін в умовах допрацювання запасів і наступного згортання гірничих робіт виконано з використанням чисельної планово-просторової геофільтраційної моделі в умовах нестационарного режиму фільтрації.

Об'єкт дослідження представлений вуглевмісними відкладеннями в межах полів шахт «Степова» та «Ювілейна», що відпрацьовують вугільні пласти C_6 та C_6^1 за простяганням, та пов'язаних з ними комплексом водонесних порід покривних відкладень.

Розміри моделі з урахуванням існуючого впливу гірничих робіт визначені у плані в прямокутних координатах 0,0 – 18800,0 м в широтному напрямку і 0,0 – 10800,0 м – в меридіональному, загальна площа моделі в межах її гідродинамічних границь складає – 125,64 км².

Область дослідження апроксимована сіткою 94 × 54 розрахункових блоків розміром 200 × 200 м, що дозволило з достатньою точністю відобразити конфігурацію ділянок шахтних полів і контури природних гідродинамічних границь. Останніми виступають: на півночі і сході – вододільне плато долини р. Самара в межах шахтних полів шахт «Степова» і «Ювілейна», на заході – р. Самара з її притоками, на півдні – контур виходу продуктивного кам'яновугільного пласта під покривні водовмісні відкладення палеогенового віку (рис. 5.8).

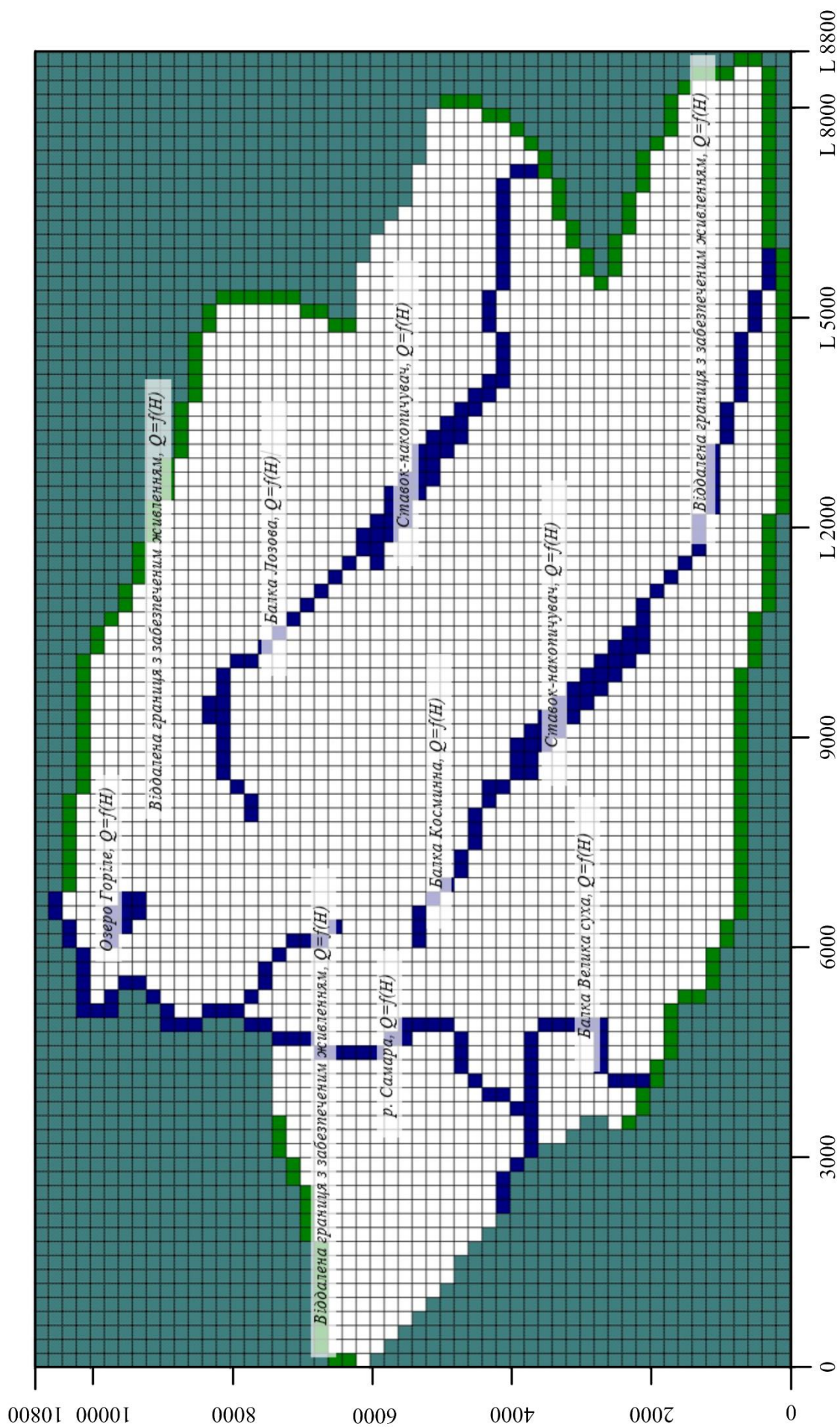


Рисунок 5.8 – Гідродинамічні границі та геометрія геофільтраційної моделі

У вертикальному розрізі модель шахтних полів представлена 10-ти шаровою товщею (рис. 5.9), що складається з покривних мезокайнозойських (розрахункові шари 1 – 3) та кам'яновугільних відкладень (розрахункові шари 4 – 10), де останні відповідають пластам C_6 та C_6^1 і за тектонічною схемою представлені трьома блоками та поділяючою їх товщею гірських порід. Розрахункові шари містять наступні водоносні комплекси та слабопроникні відклади:

– 1-й розрахунковий шар – водоносний комплекс алювіальних відкладів (заплава й надзаплавні тераси (aQ_{2-4} , aN)) та відкладів полтавської, берекської і сарматської свит (N_1s , N_1Pl , P_3br), що представлені різнозернистими пісками;

– 2-й розрахунковий шар – слабопроникні глинисті піски відкладів харківської серії (P_3hr);

– 3-й розрахунковий шар – водоносний комплекс покривних буцацько-київських відкладень ($P_3hr + (P_2kv + P_2bc)$);

– 4 – 10-й розрахункові шари – кам'яновугільні породи, де 4, 6, 8, 10 розрахункові шари – слабопроникні, що складені перешаруванням вугілля, пісковиків, вапняків, аргілітів і алевролітів; 5, 7, 9 розрахункові шари – водоносні комплекси, що характеризують відпрацьовані вугільні пласти C_6 та C_6^1 , палеоруслові пісковики та зону водопровідних тріщин, відповідно у нижньому, середньому та верхньому блоках.

Зовнішні і внутрішні гідродинамічні границі в чисельній моделі представлені граничною умовою III роду ($Q = f(H)$), причому, зовнішні гідродинамічні границі моделі верхнього шару мезокайнозойських відкладень задані за лініями рівних напорів (див. рис. 5.8), а внутрішні – відображають умови розвантаження підземного потоку в річку Самара та поверхневі водойми: ставки в балці Космінна та Лозова, озера і водотоки.

Слід зазначити, що водоносний комплекс покривних відкладень не має витриманих водотривів, тому рівнева поверхня підземних вод в розрахункових шарах 1 і 3 схожа, тобто має однакові абсолютні позначки.

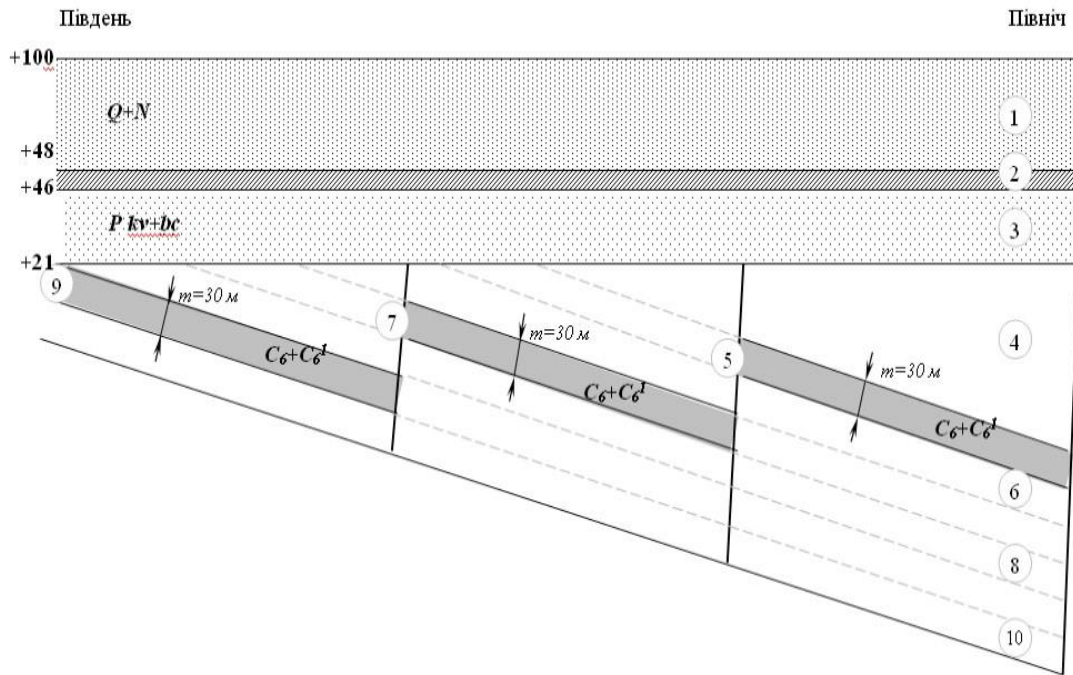


Рисунок 5.9 – Схематичний розріз моделі

Зовнішні гідродинамічні межі розрахункових шарів кам'яновугільної товщі співпадають з межами шахтного поля, які встановлені вздовж зон тектонічних порушень. На заході це Петропавлівський, Петропавлівський № 2 та Шевченківський скиди, на півночі – Брагинівський скид, сході – скиди Петропавлівський та Лозовий. Вони є непроникними екранами на шляху фільтрації підземних вод ($Q=0$). Південна границя моделі відображає зону виходу пластів C_6 та C_6^1 під буцацький водоносний горизонт, яка частково захоплює поле шахти «Першотравнева».

Внутрішні границі моделі – це гірничі виробки, які є контуром дренажу з заданим зниженням рівня підземних вод на позначці підшви вугільного пласта, і які в чисельній моделі також були задані граничною умовою III роду ($Q = f(H)$).

У відповідності до структурно-тектонічної будови шахтних полів зближені вугільні пласти C_6 та C_6^1 умовно розділені на три блоки, кожен з яких розглядається як окремий розрахунковий шар, що має свої умови живлення і розвантаження (рис. 5.10).

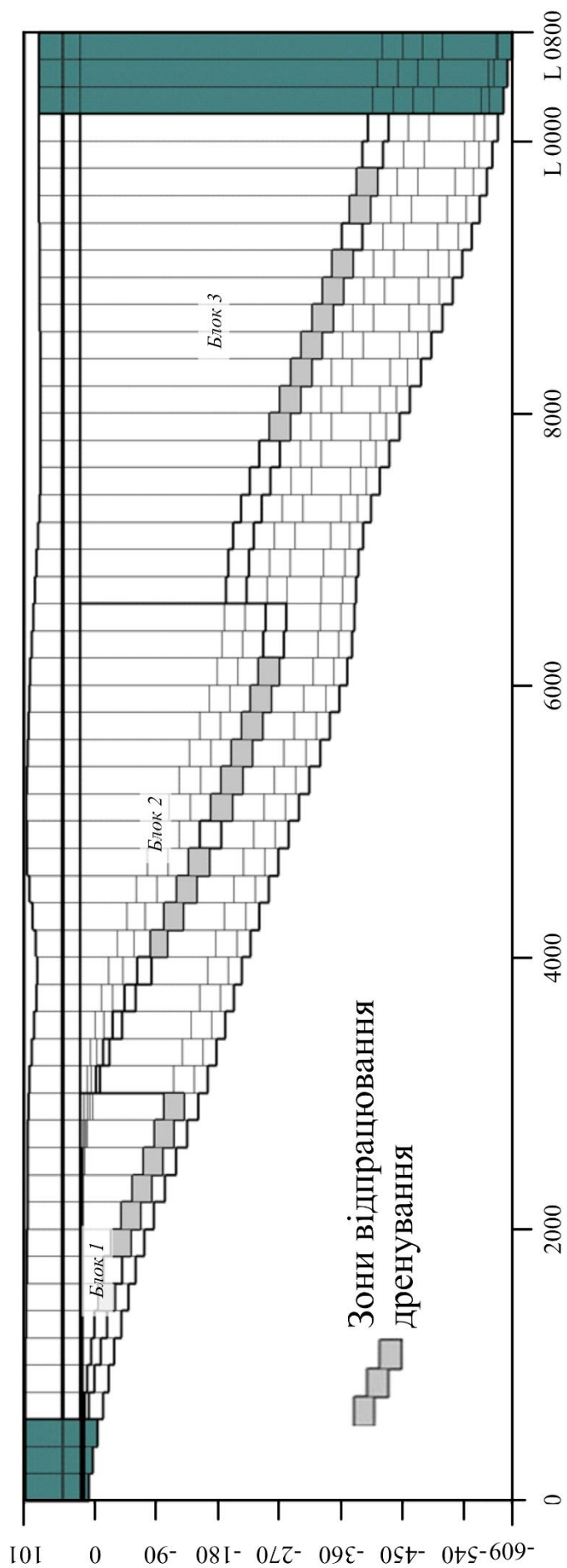


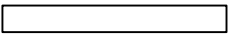





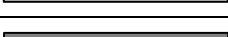








Рисунок 5.10 – Зони відпрацювання (дренування) кам'яновугільної товщі у вертикальному перерізі

Представлена схема чисельної моделі дозволяє врахувати гідродинамічний зв'язок кам'яновугільної товщі та бучацько-київського водоносного комплексу, а також кількісно оцінити їх порушений режим.

Для створення масивів вхідної інформації використані карти гіпсометрії поверхні землі, покрівлі та підшви вугільних пластів, гідрогеологічні карти на різні часові періоди, дані про фільтраційні параметри порід, результати режимних спостережень.

Значення розрахункових гідродинамічних параметрів – коефіцієнта фільтрації, гравітаційної і пружної водовіддачі, які прийняті до розрахунку і уточнені в процесі вирішення обернених задач, наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Розрахункові гідродинамічні параметри чисельної моделі

Зона розрахункового шару	Гідродинамічні параметри		
	Коефіцієнт фільтрації, $K(K_x = K_y / K_z)$, м/добу	Коефіцієнт гравітаційної водовіддачі, μ , дол. од.	Коефіцієнт пружної водовіддачі, μ^* , дол. од.
	0,5 / 0,5	0,15	0,001
	6,0 / 6,0	0,15	0,001
	0,01 / 0,001	0,02	0,00001
	0,1 / 0,01	0,10	0,00001
	0,1 / 0,01	0,10	0,00001
	0,1 / 0,01	0,05	0,001
	0,01 / 0,0001	0,02	0,00001
	0,01 / 0,001	0,02	0,00001
	1,5 / 1,5	0,15	0,001
	0,005 / 0,00005	0,02	0,00001
	0,1 / 0,01	0,10	0,00001
	0,02 / 0,002	0,02	0,00001
	0,05 / 0,0005	0,02	0,00001
	0,05 / 0,00005	0,02	0,00001
	0,012 / 0,00012	0,02	0,00001

Інфільтраційне живлення по площі моделі встановлено на рівні 13,0 мм/рік, що становить близько 2,5 % від загальної кількості атмосферних опадів, рівної середній багаторічній нормі 522 мм/рік [127].

Виділення в межах досліджуваної території суттєво різних за живленням ділянок не виконувалось, оскільки частка атмосферних опадів, що надходить на рівень підземних вод, в розглянутих умовах визначається різноспрямованою дією сукупності факторів – характеру рельєфу, наявності рослинності, ухилів денної поверхні, проникності порід зони аерації та інш.

Методикою геофільтраційного моделювання передбачалось вирішення епігнозних або обернених задач у природній і порушеній гірничими роботами гідродинамічних умовах з метою ідентифікації моделі і досліджуваного об'єкта.

У результаті їх вирішення за положенням у плані і розрізі рівнів підземних вод, а також величин водопривлівів в гірничі виробки уточнювались граничні умови моделі, її фільтраційні і ємнісні параметри.

Остаточна оцінка результатів ідентифікації виконувалась за даними функціонування досліджуваного об'єкта, тобто встановлювалась функціональна відповідність, за якої на моделі відтворюються процеси, фактичні дані про перебіг яких були зафіксовані в натурних умовах. Для цього задавались контури дренажу згідно з планами гірничих робіт в періоди, де зафіксовані характерні зміни величин водопривлівів, а також є дані режимних спостережень.

Для вирішення обернених нестационарних задач виділено 6 періодів в роботі шахт «Степова» та «Ювілейна»: 1963 – 1978 рр., 1978 – 1986 рр., 1986 – 1994 рр., 1994 – 2002 рр., 2002 – 2010 рр. 2010 – 2020 рр. (рис. 5.11), для яких зафіксовані найбільш характерні тенденції у зміні водопривлівів.

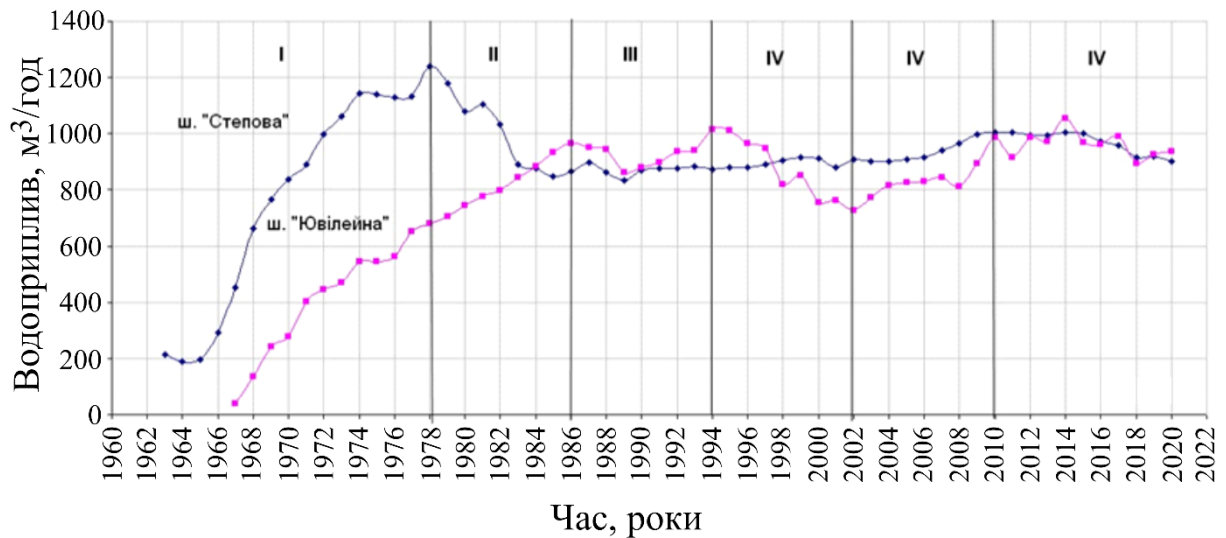


Рисунок 5.11 – Динаміка формування шахтних водоприпливів у часі

5.2.3 Ідентифікація комп'ютерної моделі геофільтрації шахтних полів і реального об'єкту

Адекватність відображення існуючих гідрогеологічних умов в чисельній моделі оцінювалась за її відповідністю прийнятій гідродинамічній схемі, збіжністю балансових складових моделі і розрахункового положення рівнів підземних вод з фактично встановленими для території шахтних полів шахт «Степова» і «Ювілейна».

Достовірність отриманих результатів підтверджується збігом контрольних даних в спостережених свердловинах і положенням рівня підземних вод на моделі (рис. 5.12).

Шахти «Степова» та «Ювілейна» в період з 1963 по 2007 р.р. відпрацьовували два зближені вугільні плати C_6 та C_6^1 , надалі й дотепер лише пласт C_6 .

Слід зазначити, що закриття та затоплення гірничих виробок шахти «Першотравнева» (2005 – 2006 рр.) суттєво не вплинуло (до $50 \text{ м}^3/\text{год}$) на гідродинамічну ситуацію суміжних шахт «Степова» та «Ювілейна».

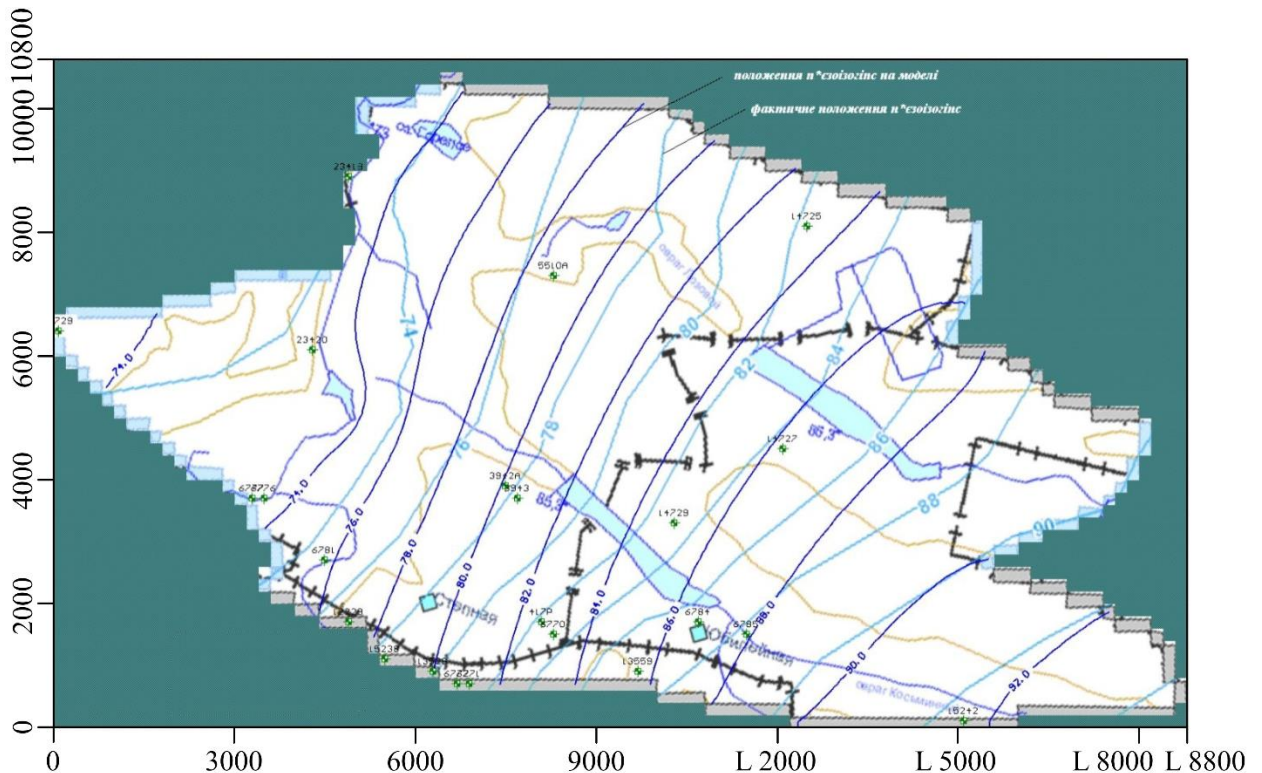


Рисунок 5.12 – Рівнева поверхня підземних вод буцацько-київського водоносного комплексу на доексплуатаційний період за результатами моделювання

Тенденція до зростання водоприпливу та їх максимальні величини спостерігались в I період по шахті «Степова» до $1239 \text{ м}^3/\text{год}$ та у II період по шахті «Ювілейна» ($965 \text{ м}^3/\text{год}$), при веденні гірничих робіт в бремсберговій частині шахтного поля.

Наступне відпрацювання поля шахти «Степова» відбувається в ухильній частині (блоки 2 – 3 моделі, рис. 5.13) з загальною тенденцією зниження (до $865 \text{ м}^3/\text{год}$) та стабілізації водоприпливів (близько $900 \text{ м}^3/\text{год}$).

Щодо розширення площі гірничих робіт по шахті «Ювілейна», то останнє продовжується як у бремсберговій, так і похилій частині (рис. 5.13), про що свідчить стрибкоподібний характер коливання водоприпливів від $1017 \text{ м}^3/\text{год}$ до $728 \text{ м}^3/\text{год}$.

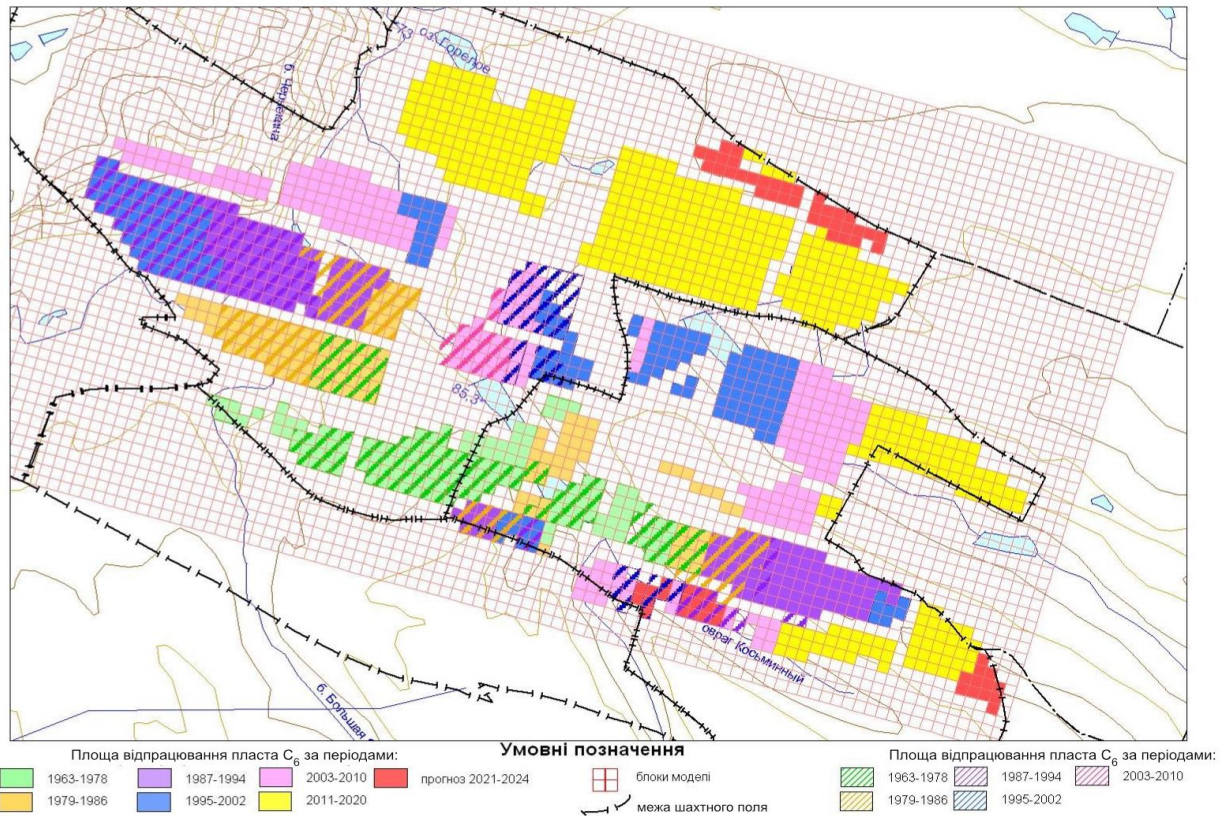


Рисунок 5.13 – Площі відпрацювання вугільних пластів за періодами

Реалізація на моделі процесу відпрацювання шахтних полів здійснювалась шляхом введення дренажних поверхонь-стоків, що характеризують гідродинамічну ситуацію на кожному з періодів.

При модельному відтворенні гідродинамічної ситуації за періодами з 1963 по 2020 рр. відхилення водоприпливів на моделі від фактичних становить 10 – 15 % (рис. 5.14, 5.15) за умов зонального розподілу фільтраційних параметрів карбонової товщі.

Результати калібрування геофільтраційної моделі станом на 2020 р. наведено на рис. 5.16.

Згідно з результатами калібрування відхилення розрахункових відміток рівнів води на моделі від фактично встановлених по вибірці спостережних свердловин, обладнаних на четвертинний і бучацький водоносні горизонти (загальною кількістю 13 свердловин), визначаються стандартною похибкою, що не перевищує 0,5 м при значенні коефіцієнта кореляції 0,977.

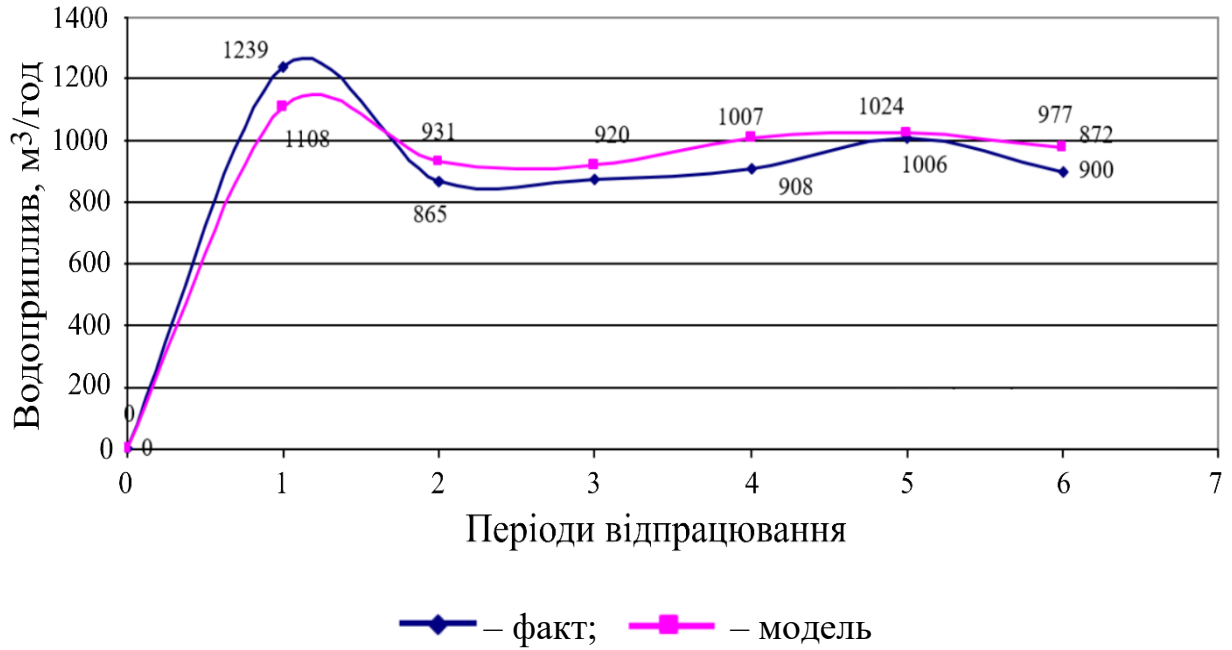


Рисунок 5.14 – Співставлення фактичних та модельних водоприпливів по шахті «Степова»

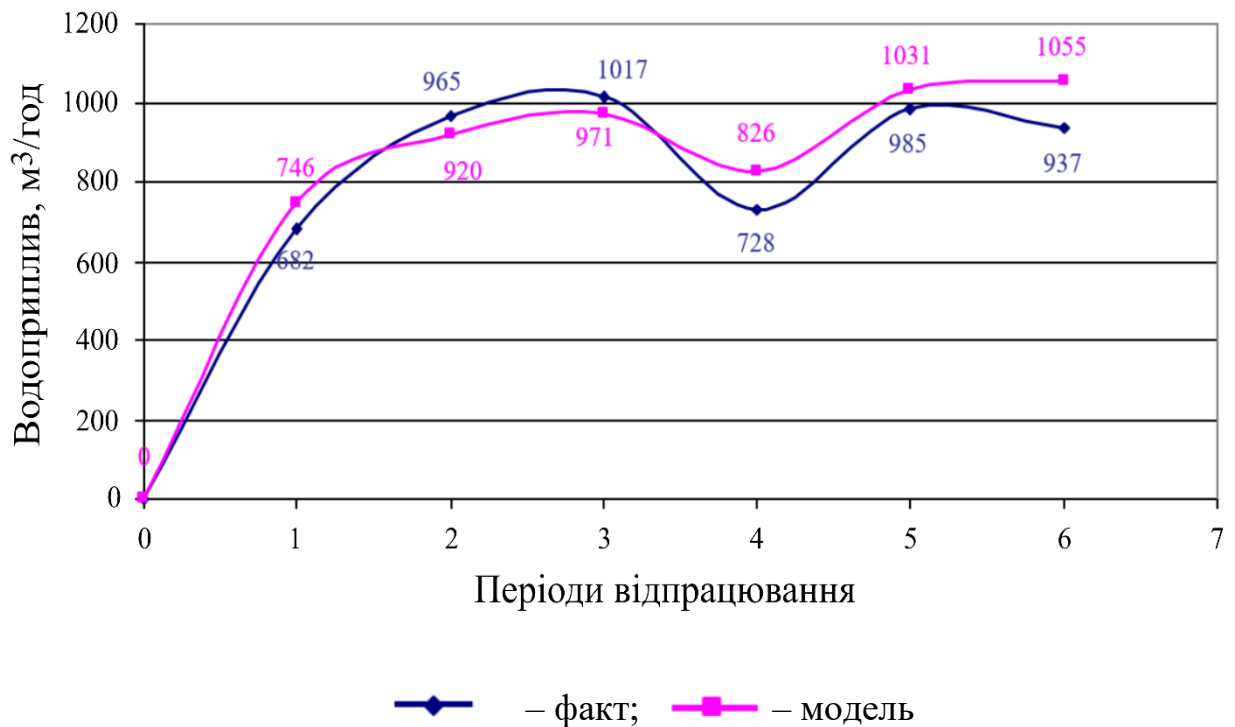
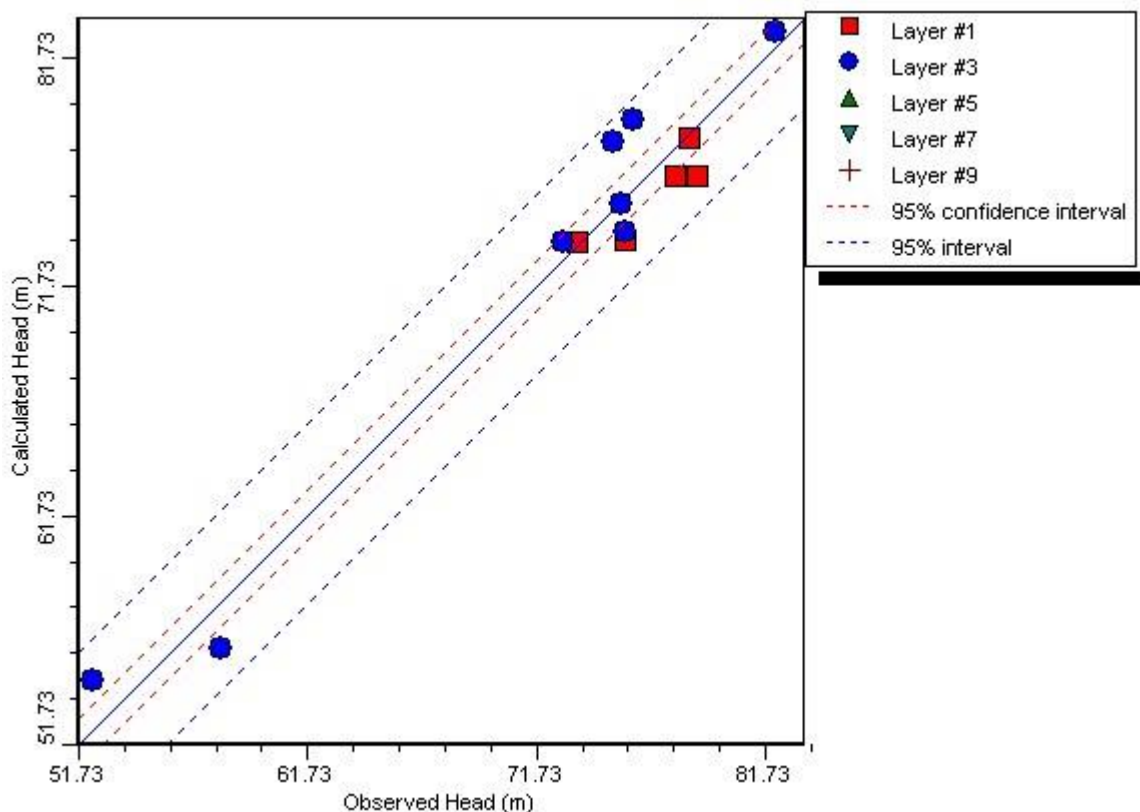


Рисунок 5.15 – Співставлення фактичних та модельних водоприпливів по шахті «Ювілейна»



Observed Head – фактичний рівень, м
 Calculated Head – розрахунковий рівень, м

Layer #1 – розрахунковий шар 1
 Layer #3 – розрахунковий шар 3
 Layer #5 – розрахунковий шар 5
 Layer #7 – розрахунковий шар 7
 Layer #9 – розрахунковий шар 9
 95 % – довірчі інтервали

Рисунок 5.16 – Результати калібрування геофільтраційної моделі станом на 2020 р. – рівневий режим, обернена задача, нестационарна фільтрація

Природні і техногенні складові балансу підземних вод досліджуваної території наведено в табл. 5.6.

За результатами епігнозного моделювання формування гідродинамічного режиму в межах шахтних полів відбувається переважно за рахунок живлення підземних вод покривної товщі (61,0%), в значно меншій мірі – ємнісних запасів (19,2%), притоку з суміжних територій (9,9%) та інфільтраційного живлення (9,8%). У розвантаженні підземних вод майже повніс-

тю переважає техногенна складова – шахтний водовідлив шахт «Степова» і «Ювілейна» (97,3%), і лише в незначних обсягах присутнє розвантаження до річкової мережі, водойм і водотоків (2,6%).

Таблиця 5.6 – Балансові складові модельованої області за результатами вирішення оберненої задачі станом на 2020 р., м³/добу

Складові балансу	Живлення	Розвантаження
Обернена задача станом на 2021 р.		
Інфільтрація	4474,79	-
Взаємозв'язок з поверхневими водотоками і водоймами	27767,73	-1200,80
Витрати по контуру	4491,77	-8,58
Шахтний водовідлив у тому числі:	-	-44281,37
– шахта «Степова»	-	-21755,90
– шахта «Ювілейна»	-	-22525,20
Ємнісна складова	8754,44	-0,00
Всього	45490,73	-45490,75
Похибка		-0,01
Нев'язка, %		-0,00

До особливостей гідродинамічного режиму покривних четвертинних і палеогенових відкладень, складених піщано-глинистими різновидами порід, відноситься формування на контурі виходу продуктивних вугільних пластів під покривні відкладення вираженої гідравлічної депресії. Остання приурочена своїм максимумом до південної частини шахтного поля шахти «Степова» – в межах розрахункового блоку 1 з абсолютними відмітками рівня підземних вод в її центрі 52,0 м.

Відсутність відчутного зниження рівнів води в товщі покривних відкладень мезокайнозою в межах блоків 2 і 3 шахтних полів пов'язана з відносною

закритістю вугільних пластів на ділянках цих блоків, а також значною потужністю і відносно низькою фільтраційною проникністю товщі вуглевмісних відкладень.

Глибина до рівня підземних вод першого від поверхні водоносного горизонту в зоні впливу водовідливу і формування депресійної воронки зображена на рис. 5.17. Слід відзначити, що ділянка автодороги поблизу блоку № 2 шахти «Степова» перетинає балку Космінна (рис. 5.18), по якій відбувається скидання шахтних вод зі ставка-накопичувача в об'ємі близько 50 млн м³ на рік. Це сприяло формуванню локальної лінзи ґрунтових вод у четвертинних відкладах у межах проммайданчика блока № 2 шахти «Степова», де рівень ґрунтових вод понад 10 років тому сягав 78,75 м.

Це вкрай важливо, якщо враховувати, що суглинисті відклади (глини) потужністю 4,7 м підстилаються шаром алювіального піску розкритою потужністю 6,8 м (свердловина № 260ПР). Піщаний шар виконує функцію фільтраційного розвантаження у р. Самару (відмітка дренажування 72,8 м). Ці обставини дозволяють визначити рівень підземних вод у підробленій заплавної частині по поверхні алювіального шару піску як п'єзометричний рівень (див. рис. 5.17).

Викладене пояснює існуючий задовільний стан ділянки автошляху (відмітка дорожнього покриття 76,0 м), що цілком відповідає нормативним вимогам [128].

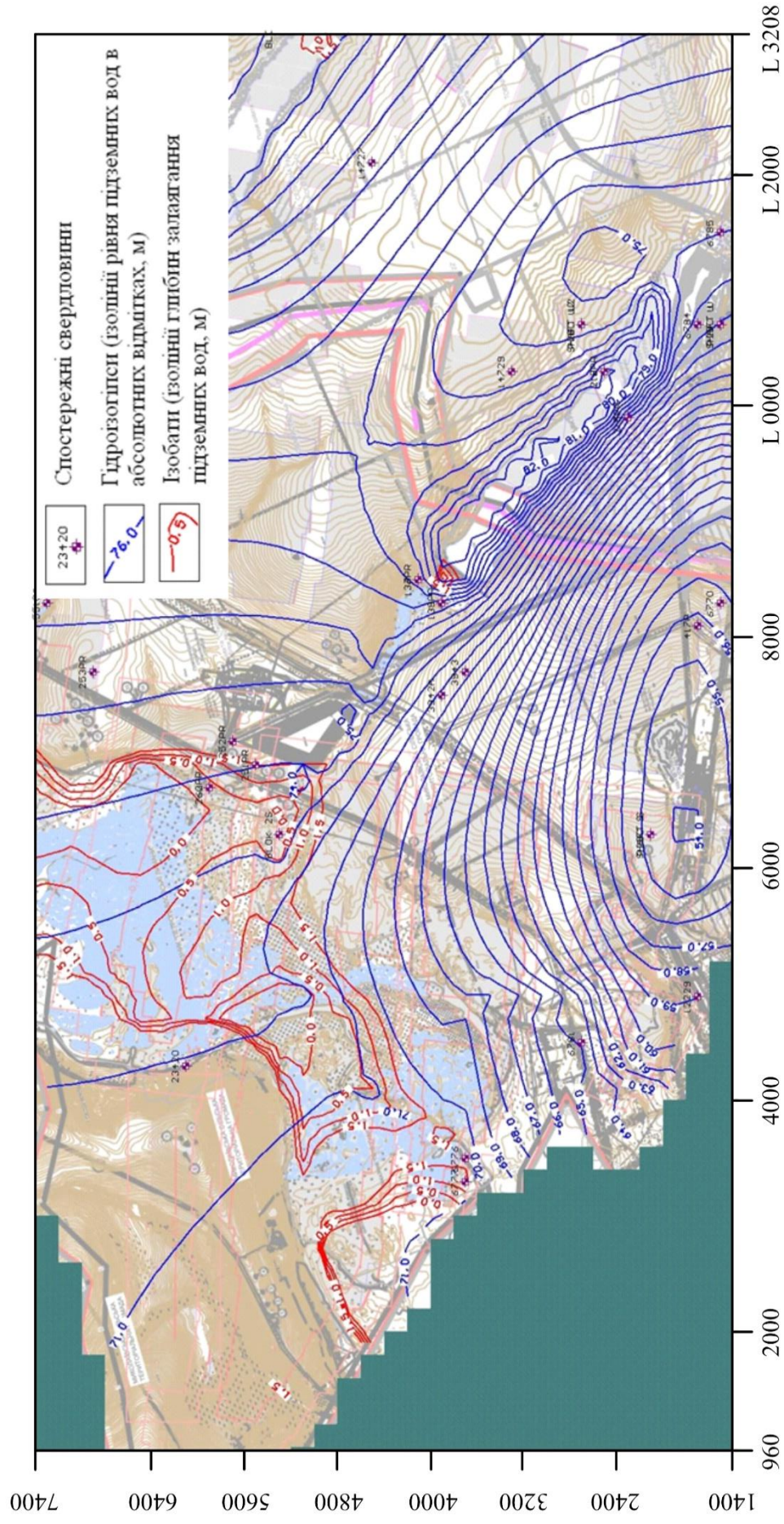


Рисунок 5.17 – Фрагмент ділянки шахтних полів у зоні впливу шахтного водовідливу і формування депресійної воронки

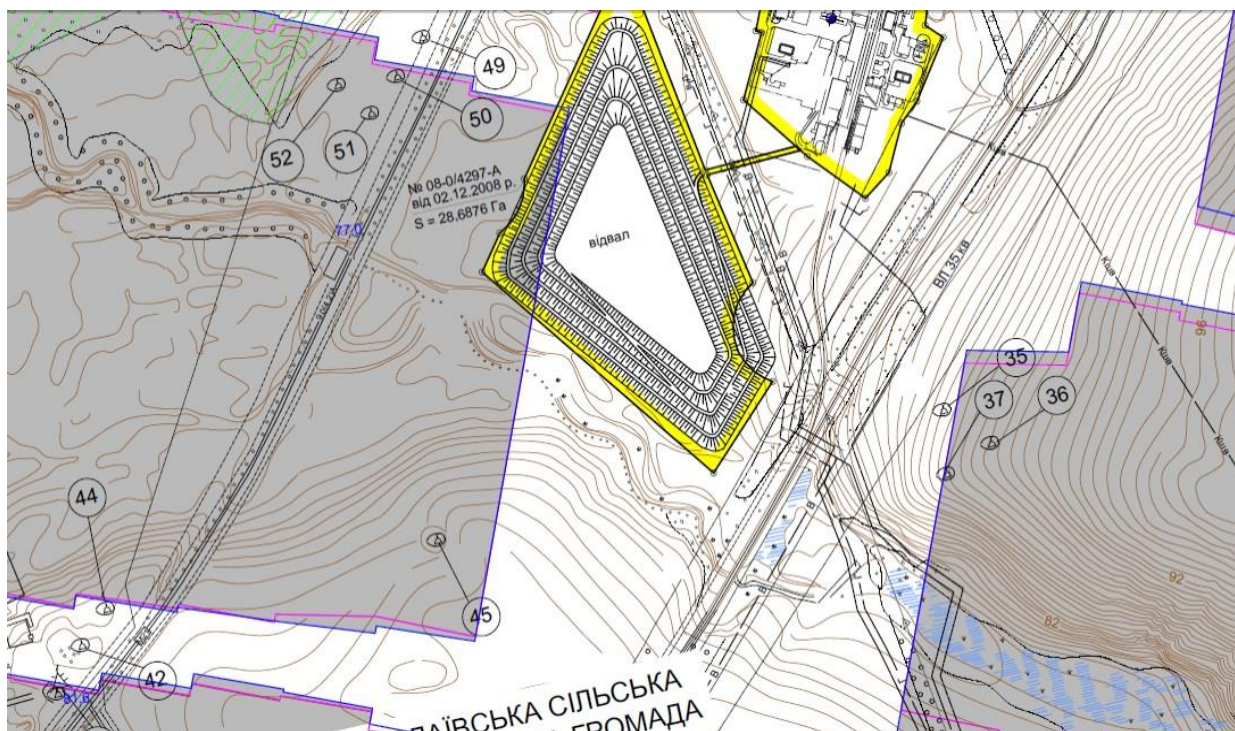


Рисунок 5.18 – Ділянка автошляху, що перетинає балку

5.3 Результати комп'ютерного моделювання для різних варіантів синхронізації гірничих робіт і закриття суміжних шахт

Гідрогеологічний прогноз наслідків закриття шахт «Ювілейна» та «Степова» виконаний згідно технічного завдання за наступними варіантами:

- **варіант 1** – плановане доопрацювання балансових запасів шахтами «Степова» і «Ювілейна» з послідовним відключенням водовідливу на шахті «Ювілейна» у грудні 2023 р., на шахті «Степова» – у грудні 2024 р.;
- **варіант 2** – закриття шахт «Степова» і «Ювілейна» відповідно до графіку доопрацювання їх запасів зі збереженням стаціонарного водовідливу на горизонті 145 м (блок 1) шахти «Степова»;
- **варіант 3** – виведення з експлуатації шахт «Степова» і «Ювілейна» за варіантом 1 з організацією водозниження на полі шахти «Степова» з використанням занурювальних насосів у стволі шахти.

– **варіант 4** – продовження роботи шахти «Ювілейна» в умовах закриття і затоплення шахти «Степова».

Виведення із експлуатації шахт «Степова» і «Ювілейна» із зупинкою шахтного водовідливу моделювалось відключенням заданого граничною умовою *III роду* ($Q = f(H)$) дренажного водозниження в межах відпрацьованих ділянок шахтного поля.

Слід відзначити, що при виконанні як епігнозних, так і прогнозних розрахунків руйнування і розущільнення гірських порід в зоні очисних виробок, а також наявність непогашених капітальних гірничих виробок в межах шахтних полів враховано введенням в розрахунок підвищених показників проникності і гравітаційної ємності (10%).

Вказані відсотки знайдені за загально прийнятою на практиці методикою моделювання шляхом багаторазового імітаційного калібрування моделі і відповідають прийнятній збіжності результатів ідентифікації об'єкта і моделі, наведених на рис. 5.17, 5.19 – 5.21 та табл. 5.8.

Зазначимо, що такий методичний підхід враховує сумарний вплив на знайдені показники водопровідності і ємності порушення масиву за періодами роботи шахт та наявність залишкових об'ємів гірничих виробок.

Коректність визначеного параметру гравітаційної ємності на рівні 10 % підтверджується:

- урахуванням потужності зони водопровідних тріщин (до 30 м), що перевищує об'єм гірничих виробок;
- відповідністю середньому значенню для сильно тріщинуватих осадових порід (сланців, вапняків, пісковиків);
- співпадінням (конгруентністю) прогнозних розрахунків з динамікою затоплення шахти «Першотравнева», що знаходиться в гідродинамічно подібних умовах на початковий період затоплення шахти.

Слід відзначити, що чутливість параметру «гравітаційна ємність» є досить високою, тому в основі обґрунтування її величини на рівні 10 % були

результати вирішення обернених задач та їх задовільна збіжність з фактичними даними для умов затоплення шахт Західного Донбасу.

Аналіз результатів прогнозних розрахунків за **варіантом 1** показав (рис. 5.19), що при повній ліквідації і затопленні шахт без водорегулювання відновлення (понад 83 % від природного) рівня підземних вод на ділянці стовбура шахти «Ювілейна» відбувається протягом 5 років – до 2028 р., на ділянці стовбура шахти «Степова» – протягом перших трьох років до 2027 р.

Зниження динаміки відновлення рівня підземних вод спостерігається при наближенні рівня карбонівих відкладень до рівня буцацького водоносного горизонту. Відставання відновлення рівня на полі шахти «Ювілейна» пояснюється тим, що шахтне поле має підвищені гіпсометричні відмітки рельєфу, а відновлення рівня стримується динамікою підйому рівня води в межах блоку 1 поля шахти «Степова» (рис. 5.19).

Подальше відновлення гідродинамічного режиму у вуглепородному масиві відбувається майже синхронно з відновленням рівня у покривних відкладеннях мезокайнозойського віку, переважно у буцацькому горизонті.

Довгостроковий прогноз відновлення рівня підземних вод до природного історичного рівня показаний на рис. 5.20.

Слід зазначити, що нелінійний характер відновлення рівневого режиму в стволах шахт (рис. 5.19, 5.20), а також низька динамічність на початкових періодах – протягом першого року (шахта «Ювілейна») та двох років (шахта «Степова») після відключення шахтного водовідливу, пов'язані з гравітаційною ємністю гірничих виробок і пружною ємністю гірського масиву в межах шахтних блоків 2 та 3.

Балансові складові моделі станом на кінець 2024 р., що відповідає періоду планованого доопрацювання вугільних запасів, наведені в табл. 5.7.

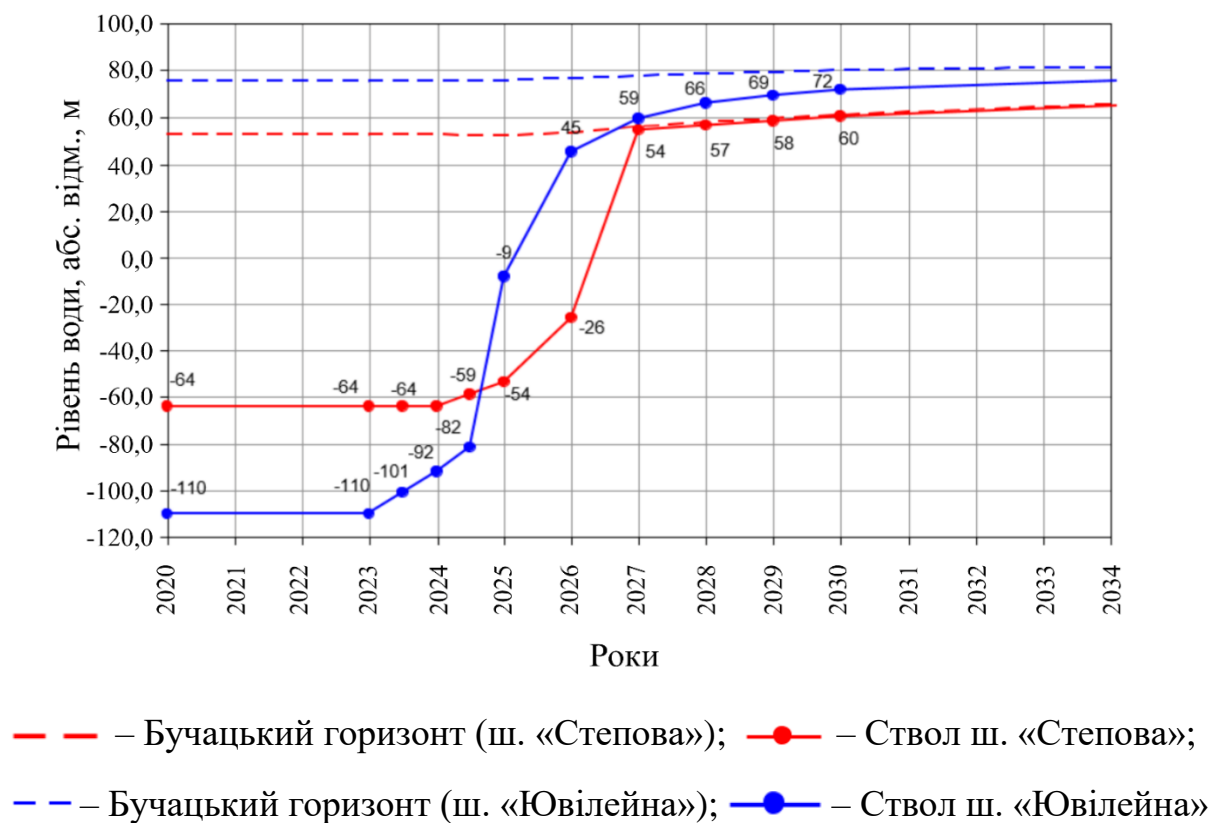


Рисунок 5.19 – Динаміка відновлення рівня підземних вод при затопленні шахт «Степова» і «Ювілейна» (варіант 1)

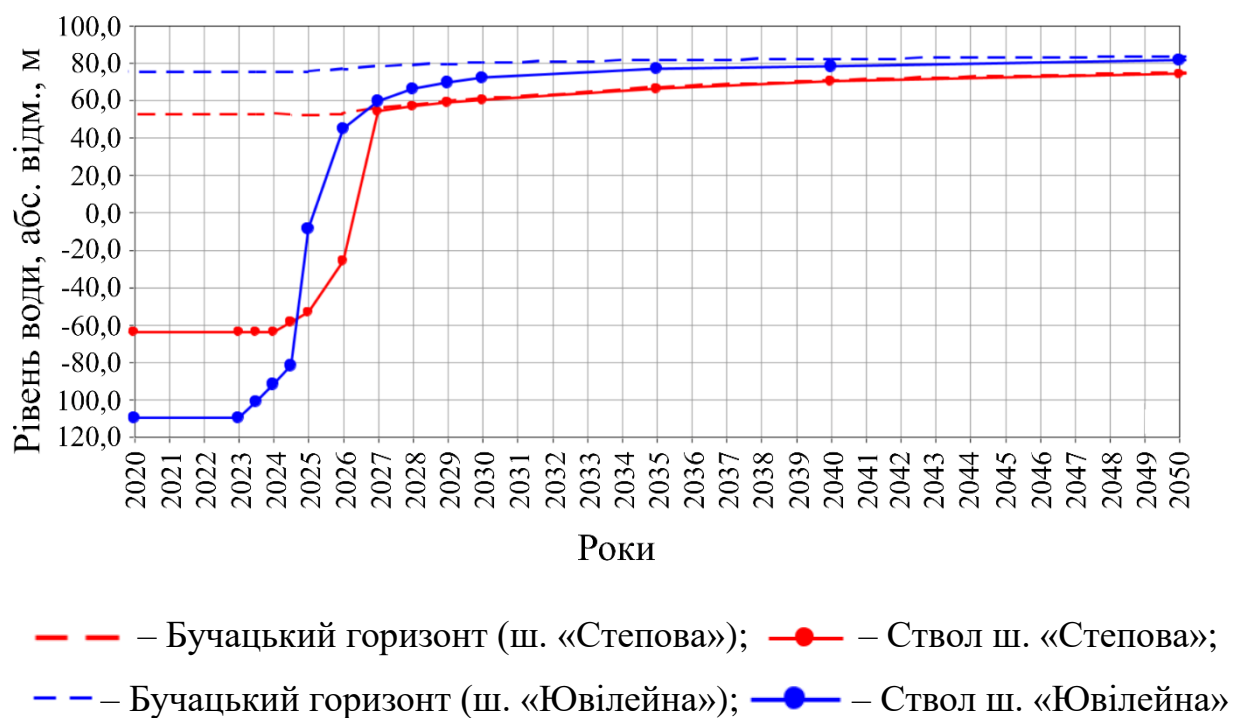


Рисунок 5.20 – Довгостроковий прогноз щодо відновлення рівня підземних вод при затопленні шахт «Степова» і «Ювілейна» (варіант 1)

Таблиця 5.7 – Баланс моделі на період допрацювання вугільних запасів
(2024 р)

Складові балансу	Живлення м ³ /добу (м ³ /год)	Розвантаження м ³ /добу (м ³ /год)
Прогнозна задача станом на 2024 р. – Варіант 1		
Інфільтрація	4474,79 (186,4)	-
Взаємозв'язок з поверхневими водотоками і водоймами	28148,39 (1172,8)	-1136,94 (-47,4)
Витрати по контуру	4640,23 (193,3)	-6,96 (-0,3)
Шахтний водовідлив	-	-21637,08 (-901,5)
у тому числі:		
- шахта «Степова»	-	-21637,08 (-901,5)
- шахта «Ювілейна»	-	-0,00
Ємнісна складова	9136,18 (380,3)	-23618,72 (-984,1)
Всього	46399,60 (1933,3)	-46399,70 (-1933,3)
Похибка		-0,11 (-0,004)
Нев'язка, %		-0,00

Обґрунтування безпеки ведення гірничих робіт на шахті «Степова» при затопленні шахти «Ювілейна» виконано для найгірших умов формування максимальних напорів до 190 – 220 м і тріщинуватого розпушення в покрівлі очисних виробок. У цьому випадку величина приросту шахтних водоприпливів до очисних виробок шахти «Степова», що відпрацьовуються протягом 2024 р., може сягати 7,9 м³/год.

При відпрацюванні лав шахти «Степова» за умов відключення водовідливу шахти «Ювілейна» може виникати «гідралічного» перевантаження кріплення [74], що не є критичним за належного моніторингу зрушень покрівлі та випереджального зняття гідралічного тиску в основній покрівлі на підшві пласта С₆¹.

Зміни у гідродинамічному режимі покривної товщі у часовому перерізі ілюструються характером рівневих поверхонь у бучацькому водоносному горизонті, наведених для розрахункових періодів 2024, 2029, 2034 років. Вони відповідають терміну доопрацювання балансових запасів шахтою «Степова» за **варіантом 1** і прогнозним періодам 5 та 10 років затоплення шахт. На

гідродинамічних профілях відображено динаміку відновлення рівня підземних вод кам'яновугільної товщі станом на 2034 рік.

Згідно з виконаними прогностичними розрахунками видно (рис. 5.21), що найбільш суттєві зміни рівневого режиму прослідковуються в межах блоку 1 шахти «Степова» і приурочені до ділянки сформованої гідравлічної депресії у бучацькому водоносному горизонті. Для цієї ж ділянки характерна і найбільша швидкість відновлення рівнів води як у покриваючих відкладеннях, так і у вуглепородному масиві, що пояснюється близькістю розташування до зони виходу пластів.

Відновлення рівневого режиму на ділянці блоку 1 поля шахти «Степова» супроводжується зменшенням глибини залягання рівня підземних вод у верхньому водоносному горизонті переважно у межах південної частини заплави р. Самара.

На розрахункові прогностичні періоди 5, 10 років (2029, 2034 рр.) величини підйому рівня води в межах заплавної частини р. Самари досягають від 1,0 – 6,0 м на 5-ти річний період затоплення шахт до 6,0 – 17,0 м – відповідно на 10-ти річний розрахунковий термін. При цьому максимальне підняття рівнів води, яке відбувається поза межами заплавної частини території шахтного поля шахти «Степова», складає на 10-ти річний термін після виведення шахт з експлуатації 21,0 – 22,0 м і відповідає максимуму сформованої станом на 2024 р. гідравлічної депресії.

При відновленні рівнів підземних вод з урахуванням осідання підроблених ділянок формуються площі затоплення (глибина до води 0 м) і потенційного підтоплення денної поверхні (глибина залягання рівня підземних вод до 1,5 м), що охоплюють південну частину заплави р. Самари (рис. 5.21).

Слід відзначити, що виділена ділянка прогнозованого затоплення і підтоплення (рис. 5.21) була здренована під дією шахтного водовідливу (див. рис. 5.17), про що також свідчать результати опитування місцевих жителів селища Миколаївка, в колодязях яких на глибинах 5,0 – 7,0 метрів вода відсутня.

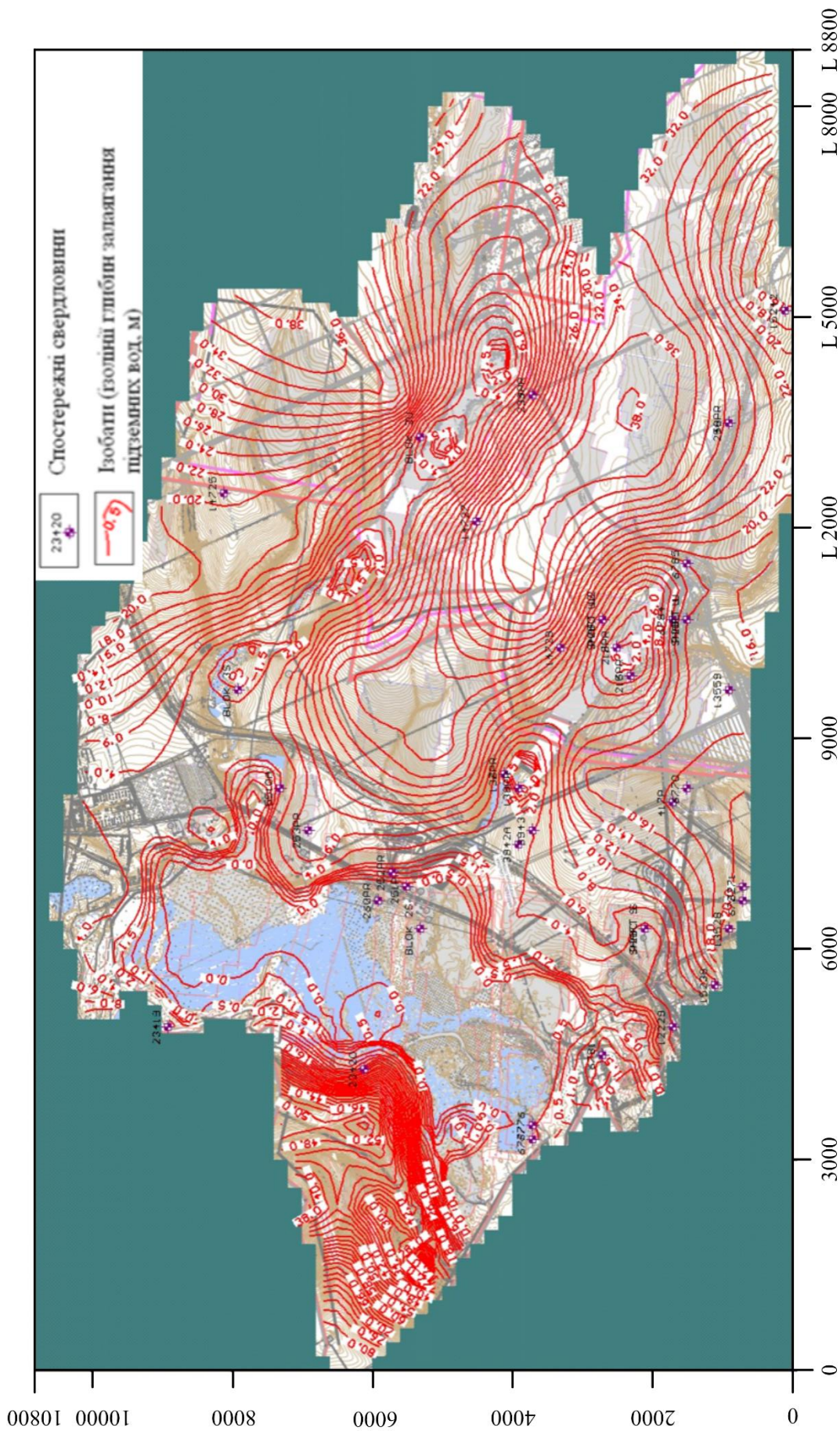


Рисунок 5.21 – Прогнозна глибина залягання рівня підземних вод станом на 2034 р.
(розрахунковий період 10 років), м – варіант 1

Тобто, зміна природного гідрогеологічного фону південної ділянки заплави р. Самари, в тому числі заказника «Петропавлівські лимани», відбулася саме в період роботи водовідливу шахти. А при затопленні шахти рівні підземних вод в заплаві, в т.ч. і на площі заказника, відновлюються до природного доексплуатаційного положення

Проте для запобігання підтоплення автодороги та частини селища Миколаївки **варіантом 2** розглядалась можливість довготривалого підтримання стаціонарного водовідливу у блоці 1 шахти «Степова» на горизонті 145 м.

Згідно з розрахунковими даними підтримання стаціонарного водовідливу за цим варіантом забезпечує стає положення рівнів підземних вод як у вуглепородному масиві, так і водоносному комплексі мезокайнозойських відкладень, що дозволяє зберегти існуючий рівневий режим в межах заплавної р. Самара (рис. 5.22).

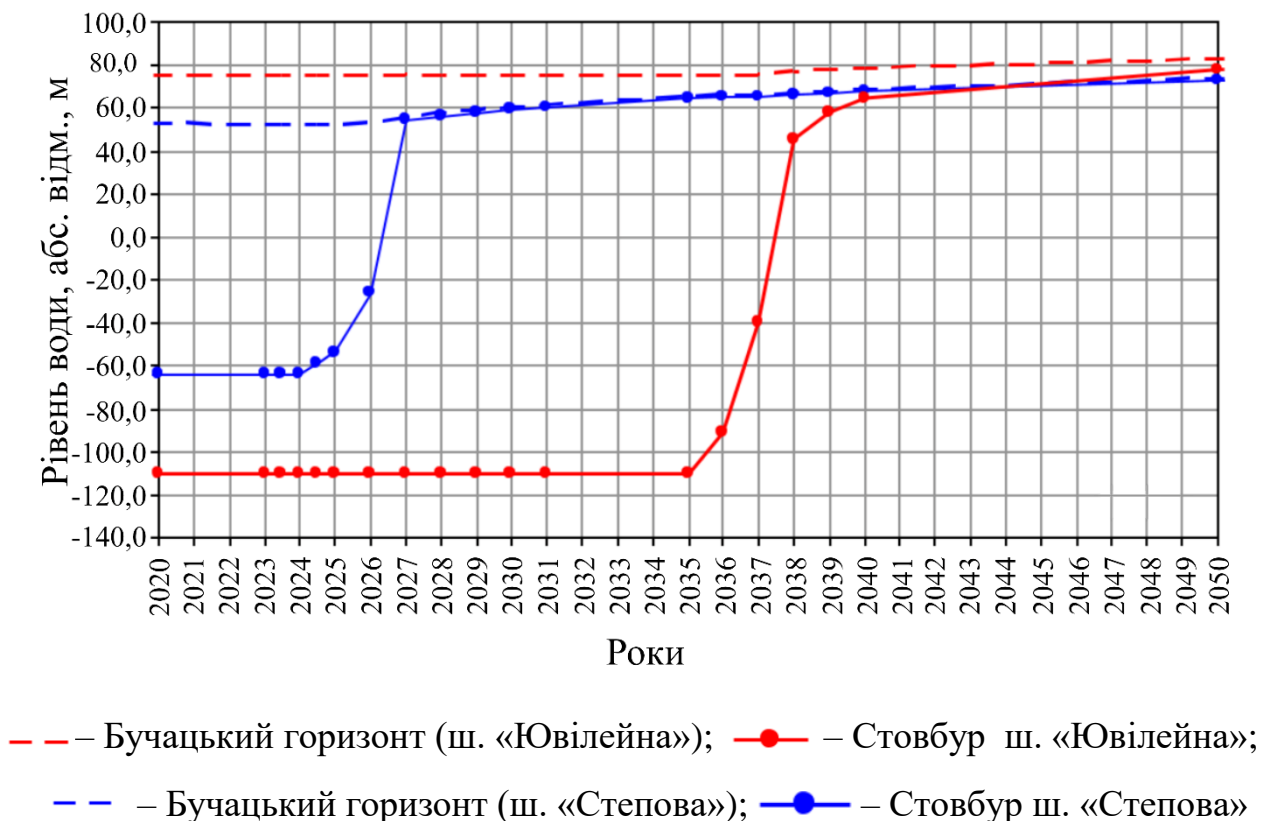


Рисунок 5.22 – Динаміка відновлення рівня підземних вод при затопленні шахт «Степова» і «Ювілейна» (варіант 4)

Необхідно зауважити, що робота стаціонарного водовідливу буде ефективною за умов збереження дренажного впливу капітальних гірничих виробок на горизонті 145 м.

Крім того, підтримання сталого рівневого режиму у даному випадку супроводжується збільшенням шахтного водовідливу в блоці 1 шахти «Степова» на величину від 7,0 % до 12,0 % протягом 20-ти років, що пов'язано з загальним відновленням гідродинамічного режиму в межах шахтних полів затоплюваних шахт (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Прогнозні водопріпливи при підтримці водовідливу ш. «Степова» (гор. 145), розрахунковий період 2024 – 2044 рр. – варіант 2

Шахти	Шахтне поле	Розрахункові водопріпливи, м ³ /год			
		2024 р.	2029 р.	2034 р.	2044 р.
Шахта «Степова»	Блок 1 (гор. 145)	492,0	526,0	539,0	550,0

При застосуванні згідно з **варіантом 3** занурювальних насосів у стовбурі шахти «Степова» значного ефекту від їх роботи не спостерігається (рис. 5. 23), що пов'язано з відомим у гідродинаміці підземних вод нівелюванням депресії у площині лінійної дрени при її затопленні або плоско радіальній депресії навколо вертикальної свердловини (шахтного ствола). Це означає, що при затопленні магістральні і підготовчі виробки втрачають дренажні функції і призводять до незначних змін загальної проникності порушеного породного масиву, що дронується або затоплюється. Зі співставлення об'ємів порушеного масиву (30 виїмкових потужностей вугільного пласта) та об'єму капітальних і підготовчих виробок, що затоплюються, для шахт «Степова» та Ювілейна» визначено, що гідравлічні канали у фільтраційному масиві складають менше 0,7 %. З урахуванням ламінарного режиму затоплення це практично не впливає на прогнозні показники. При продовженні роботи шахти «Ювілейна» в умовах закриття шахти «Степова» (варіант 4) відновлення рівня

відбувається аналогічно варіанту 1 (рис. 5.23), але уповільнюється динаміка відновлення на полі шахти «Степова» в бучацькому водоносному горизонті.

Прогнозне збільшення загальношахтних водоприпливів при веденні гірничих робіт в нижньому блоці шахти «Ювілейна» не більше 50 м³/год.

5.4 Рекомендації щодо мінімізації гідроекологічних наслідків затоплення шахт у режимі синхронізації з гірничими роботами

1. Комп'ютерне моделювання наслідків закриття шахт «Ювілейна» та «Степова» виконано за чотирьох завдань варіантів.

2. При ліквідації і затопленні шахт відновлення природного рівня підземних вод на прилеглих площах до стовбура шахти «Ювілейна» відбувається протягом 5 років – до 2028 р., а біля ствола шахти «Степова» – до 2027 р.

3. Випереджальне відключення водовідливу шахти «Ювілейна» не призводить до значного зростання шахтних водоприпливів на шахті «Степова» (в цілому їх збільшення не перевищує 10 м³/год).

4. За найбільш несприятливих умов формування напорів і тріщинуватого розпушення в покрівлі очисних виробок величина приросту шахтних водоприпливів до очисних виробок шахти «Степова», що відпрацьовуються протягом 2024 року, може сягати 8,0 м³/год.

5. При відпрацюванні лав шахти «Степова» за умов відключення водовідливу шахти «Ювілейна» слід врахувати можливість «гідравлічного» перевантаження кріплення, що не є критичним за належного моніторингу зрушень покрівлі та випереджаючого зняття гідравлічного тиску в основній покрівлі на підшві пласта С₆¹ (за досвідом шахти «Самарська»).

6. Найбільш суттєві зміни рівневого режиму очікуються в межах гідравлічної депресії шахти «Степова» у бучацькому водоносному горизонті. Для цієї ж ділянки характерна й найбільша швидкість відновлення рівнів води як у покриваючих відкладеннях, так і у вуглепородному масиві.

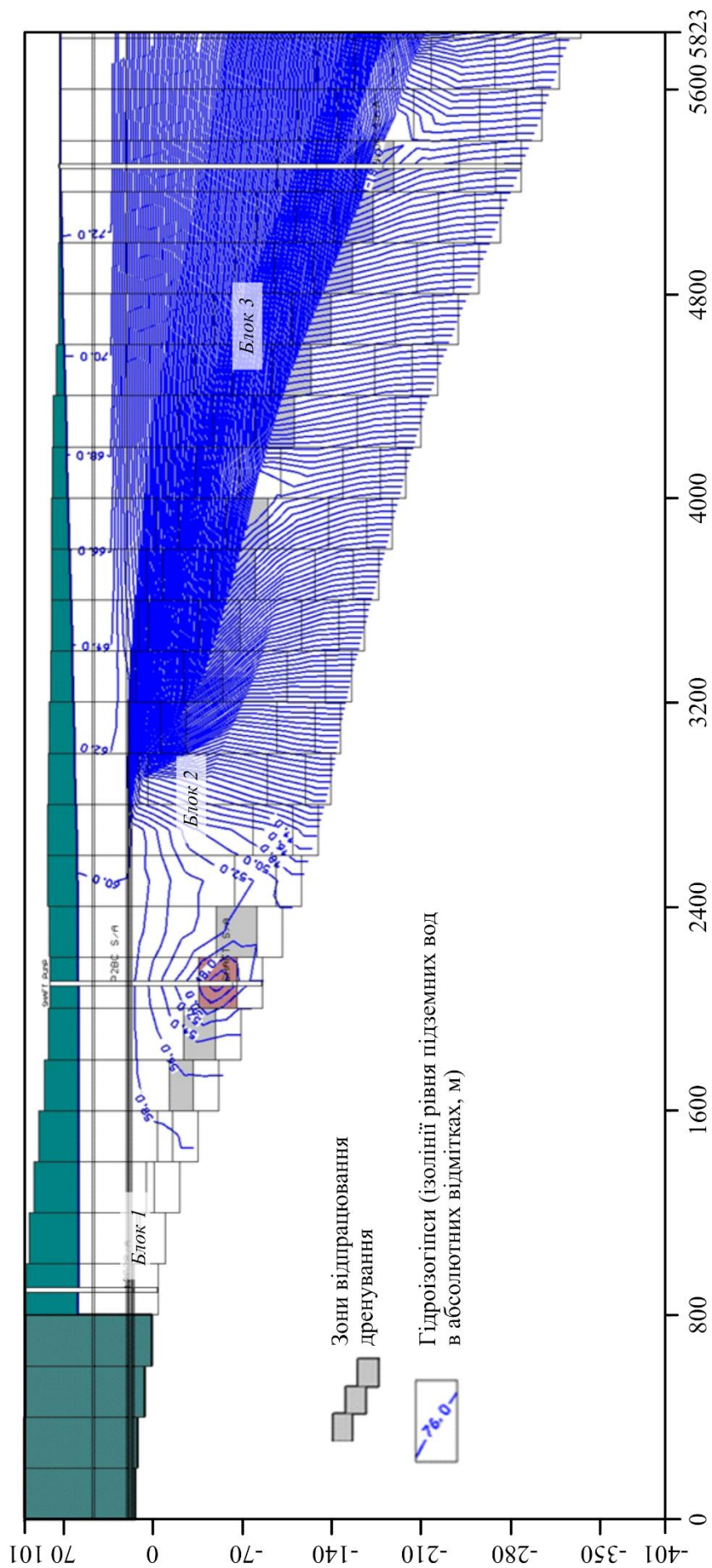


Рисунок 5.23 – Прогнозний гідродинамічний профіль ділянки стовбура ш. «Стєпова» при водозниженні у стовбурі станом на 2029 р. (розрахунковий період 5 років), м – варіант 3

7. На підроблених ділянках шахтних полів сформовано площі підвищення рівня підземних вод та підтоплення поверхні в південній частині заплави р. Самара з глибиною залягання рівня 0 – 1,5 м. У зону підтоплення потрапляє ділянка автомобільної дороги. За детального розгляду інженерно-геологічної будови і динаміки зміни гідрогеологічних умов при роботі шахтного водовідливу та його відключенні визначено, що ділянка автомобільної дороги знаходиться і в подальшому буде експлуатуватися в нормативних умовах.

Вищезгадану ділянку було здреновано під дією шахтного водовідливу, тому на глибинах 5 – 7 м ґрунтові води відсутні.

8. Вплив закриття і затоплення шахти «Степова» на водоприпливи в шахту «Дніпровська» відсутній. Це обумовлено наявністю в покривних відкладеннях регіональної гідродинамічної границі – річки Самара, а в продуктивній товщі карбону фільтраційного бар'єру у вигляді тектонічного порушення.

9. Зміна природного гідрогеологічного фону заплави річки Самари (у тому числі заказника «Петропавлівські лимани») відбулася в період роботи водовідливу шахти. При затопленні шахти рівні підземних вод в заплаві, як і на площі заказника, відновляться до природного доексплуатаційного положення.

10. Для гарантованого запобігання підвищення рівня ґрунтових вод поблизу автодороги та частини селища Миколаївка моделювався варіант підтримання стаціонарного водовідливу шахти «Степова» на горизонті 145 м **(варіант 2)**.

За цим варіантом забезпечується стале положення рівнів підземних вод як у вуглепородному масиві, так і водоносному комплексі мезокайнозойських відкладень.

Підтримка рівнів підземних вод за даним варіантом передбачає довгострокову відкачку підземних вод і скидання їх в гідрографічну мережу, що не наближає до вирішення проблеми водорегулювання при закритті шахт.

11. Застосування занурювальних насосів (**варіант 3**) у стовбурі шахти «Степова» малоефективне, що пояснюється обмеженим гідравлічним впливом магістральних виробок у затопленому стані. Розташування занурювальних насосів нижче горизонту 145 м фактично відповідає варіанту 2.

12. При продовженні роботи шахти «Ювілейна» в умовах закриття і затоплення шахти «Степова» (**варіант 4**) відновлення рівня відбувається аналогічно варіанту 1, але уповільнюється динаміка відновлення на полі шахти «Степова» в бучацькому водоносному горизонті.

Прогнозне збільшення загально шахтних водоприпливів при веденні гірничих робіт в нижньому блоці шахти «Ювілейна» не більше 50 м³/год.

13. Узагальнюючи вищенаведене, слід відзначити екологічність **варіанту 1** для відновлення природних умов зони заказника «Петропавлівські лимани» та наближення території до умов самодренування. Повне відновлення рівня підземних вод першого від поверхні водоносного горизонту упродовж 10 років має відбуватися в моніторинговому режимі з обґрунтуванням і облаштуванням системних заходів водорегулювання (наприклад, розчисткою та заглибленням днищ балок).

5.5 Оцінка економічної ефективності використання оновленого програмного забезпечення для побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля

Як зазначалося у п.р. 1.1, кожне підприємство з видобутку кам'яного вугілля, як і всі проекти, мають свій життєвий цикл, по закінченню якого передбачається припинення видобувної діяльності та реалізація плану ліквідації підприємства. Цей етап включає демонтаж технологічного обладнання та інфраструктури, підготовка виробок до закриття і забезпечення початкового рівня якості земельних ресурсів. Етап закриття зазвичай є найдорожчим серед інших етапів, і для його успішного завершення потрібні значні ресурси та досвід. Тобто, після закриття гірничодобувне підприємство повинно гаранту-

вати, що землі в межах гірничого відводу залишаться стабільними та безпечними упродовж тривалого періоду. Етап після закриття може тривати багато років, і це важливо для забезпечення того, щоб ділянка залишалася безпечною і не становила ризику для навколишнього середовища чи громади. Також необхідно зазначити, що закриття шахт призводить до зміни геофільтраційного режиму підземних вод (див. п.р 5.1 – 5.4) та фізичному формуванню гідроризиків і, як наслідок, до гідроекологічних наслідків згортання гірничих робіт шахтних полів у Західному Донбасі.

На підставі вищенаведеного можна сформулювати методичний підхід до зменшення негативних наслідків під час закриття вугледобувних підприємств. Цей підхід полягає у визначенні та прогнозуванні площ земельних ділянок та відповідно знаходження зон потенційного підтоплення в межах гірничого відводу після закриття шахти при використанні розробленого програмного забезпечення.

Програмне забезпечення дозволить чітко визначити межі затоплення враховуючи геологічні та технічні особливості ділянки гірничого відводу. Маючи дані щодо майбутніх ділянок підтоплення можна проводити відновлення саме на тих, які не будуть підтоплені, та у період ліквідації видобувного підприємства. Наведений автором підхід може мати економічний ефект при досягненні умови:

$$S_p = S_d \cdot V_p + S_{dl} \cdot V_k + V_{sw} + R \rightarrow \min$$

де S_p – вартість відновлення площі гірничого відводу, тис. грн;

S_d – площа ділянок, які не будуть підтоплені, га;

V_p – виробничі витрати на відновлення земель, тис. грн/га;

S_{dl} – площа ділянок, які будуть підтоплені чи не підлягають відновленню, га;

V_k – компенсаційні витрати за неможливості повернення земель до власника, тис. грн/га;

V_{sw} – витрати на створення програмного забезпечення для прогнозування площ підтоплення, тис. грн;

R – витрати, що пов'язані з орендою земельних ділянок під час закриття вугледобувного підприємства.

Своєчасність отримання інформації керівництвом вугледобувного підприємства про можливість здійснення відновлення певних ділянок, дає змогу отримати економічний ефект. Цей ефект залежить від швидкості повернення ділянок до землевласника за рахунок зменшення орендних платежів. Також при прогнозуванні території підтоплення можна визначити цю площу у кількісному виразі і тим самим розрахувати витрати на компенсацію вартості цих ділянок у відповідності до цільового призначення.

Для перевірки виконання умови розрахуємо приклад щодо визначення території підтоплення за умови закриття шахти «Тернівська», яка знаходиться у межах донецького гірничо-промислового басейну. Аналіз та оцінка рельєфу місцевості проводились при використанні геоінформаційної системи QGIS. Цей інструмент є вільною географічною системою, яка призначена для створення і використання картографічних продуктів. Інструмент надає змогу використовувати дані держгеокадастру, створювати необхідні шари та визначати межі об'єкту дослідження (рис. 5.24). У даному випадку картографічним продуктом став план гірничого відводу та прилеглої території шахти «Тернівська» з нанесенням його меж та ділянок підтоплення у разі закриття підприємства.

Як відомо метою роботи вугледобувного підприємства є видобуток вугілля та отримання прибутку. Головним чинником розміщення комунікацій та промислових об'єктів є геометричне розташування покладів у надрах землі, а категорія земель, які розташовані в межах гірничого відводу, як чинник прийняття рішення щодо розробки родовища саме у цьому місті займає другорядне місце. Внаслідок цього у межах гірничого відводу можуть опинитись землі з різним цільовим призначенням.



1 – межі гірничого відводу; 2 – ділянки потенційного затоплення після закриття підприємства

Рисунок 5.24 – План земельної ділянки розташування шахти «Тернівська»

Відповідно до статті 19 Земельного кодексу України, земельні ділянки поділяються на категорії, які характеризують їх цільове призначення. Всього на сьогодні існує дев'ять категорій земель:

- сільськогосподарського призначення;
- житлової та громадської забудови;
- природно-заповідного фонду та іншого природоохоронного призначення;
- оздоровчого призначення;

- рекреаційного призначення;
- історико-культурного призначення;
- лісогосподарського призначення;
- водного фонду;
- промисловості, транспорту, електронних комунікацій, енергетики, оборони та іншого призначення.

Ділянки землі, які розташовані в межах гірничого відводу мають різне призначення (табл. 5.9). А від так і сума компенсації відповідно до нормативної грошової оцінки внаслідок неможливості повернення ділянки власнику, буде різною. Ділянки, які потрапили до зони ризику розподілені за кадастровими номерами та ідентифікаторами (d1-d19).

Таблиця 5.9 – Характеристика земельних ділянок за основними ознаками

Ідентифікатор	Номер	Площа		Цільове призначення	
		підтоплення, га	повернення, га	категорія	мета
1	2	3	4	5	6
d1	12235818 00:01:001: 0601	12,43	1,45	Землі сільськогосподарського призначення	Землі запасу (земельні ділянки кожної категорії земель, які не надані у власність або користування громадянам чи юридичним особам)
d2	12235818 00:01:001: 0563	71,7	96,55	Землі лісогосподарського призначення	
d3	12235813 00:08:001: 0341	2,64		Землі сільськогосподарського призначення	01.04 Для ведення підсобного сільського господарства
d4	12235813 00:08:001: 0355	8,6		Землі сільськогосподарського призначення	01.04 Для ведення підсобного сільського господарства
d5	12235813 00:08:001: 0338	20,4	17,76	Землі сільськогосподарського призначення	01.04 Для ведення підсобного сільського господарства

Продовження табл. 5.9

1	2	3	4	5	6
d6	12235813 00:02:002: 0084	4	10,24	Землі промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та іншого призначення	11.01 Для розміщення та експлуатації основних, підсобних і допоміжних будівель та споруд підприємствами, що пов'язані з користуванням надрами
d7	12235813 00:08:001: 0356	69,41	46,3	Землі сільськогосподарського призначення	01.04 Для ведення підсобного сільського господарства
d8	12235813 00:02:002: 1029	56,7	56,7	Землі сільськогосподарського призначення	
d9	12235813 00:02:002: 0086	5,13	62,05	Землі промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та іншого призначення	11.01 Для розміщення та експлуатації основних, підсобних і допоміжних будівель та споруд підприємствами, що пов'язані з користуванням надрами
d10	12135000 00:01:068: 0002	25,9	46,1	Землі промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та іншого призначення	11.01 Для розміщення та експлуатації основних, підсобних і допоміжних будівель та споруд підприємствами, що пов'язані з користуванням надрами
d11	12135000 00:01:067: 0061	0,058	--	Землі сільськогосподарського призначення	--
d12	12135000 00:01:067: 0060	0,1	--	Землі житлової та громадської забудови	--
d13	12135000 00:01:037: 0105	0,1	--	Землі житлової та громадської забудови	--

Продовження табл. 5.9

1	2	3	4	5	6
d14	12135000 00:01:037: 0093	0,086		Землі сільськогосподарського призначення	
d15	12135000 00:01:037: 0094	0,034		Землі сільськогосподарського призначення	
d16	12135000 00:01:037: 0082	0,1		Землі житлової та громадської забудови	
d17	12135000 00:01:037: 0097	0,1		Землі житлової та громадської забудови	02.01 Для будівництва і обслуговування житлового будинку, господарських будівель і споруд (присадибна ділянка)
d18	12135000 00:01:036: 0094	0,1		Землі житлової та громадської забудови	02.01 Для будівництва і обслуговування житлового будинку, господарських будівель і споруд (присадибна ділянка)
d19	12135000 00:01:036: 0095	0,057		Землі сільськогосподарського призначення	01.03 Для ведення особистого селянського господарства

При виконанні оцінки економічної ефективності використання автоматизованої системи керування гідроекобезпекою в межах шахтного поля шахти «Тернівська» розглядаються три варіанти.

Варіант 1. Площа гірничого відводу шахти «Тернівська» складає 1439,9 га. Для аналізу використовувались лише ті ділянки, які за прогнозними розрахунками входять до зони ризику та можуть бути підтоплені повністю або частково. Відповідно до характеристики земель гірничого відводу, підлягають поверненню ділянки площею 337,15 га до попереднього землевласника, яким у більшості випадків є держава, що надавала ділянки в оренду під ведення сільськогосподарської діяльності (122,21 га) чи для житлової та громадської забудови. Необхідно повернути до лісового господарства ділянки площею

96,55 га. Також встановлено, що землі площею 118,39 га мають цільове призначення – «Землі промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та іншого призначення». Отже їх повертати не потрібно. Вони і так належать вугледобувному підприємству, що дозволяє керівництву на власний розсуд розпоряджатись їх подальшим призначенням. Отже можна виконувати підготовку до відновлення земельних ділянок та передачі їх до попереднього власника на площі 122,21 га для повернення їх до сільськогосподарського обігу та площею 96,55 га – до лісогосподарського.

Повернення земель до власників забезпечує зниження фінансового навантаження на вугледобувне підприємство, так як зменшується сума оренди за користування земельними ділянками. Зазвичай вугледобувне підприємство бере в оренду земельні ділянки і сплачує землевласнику грошову винагороду, що співрозмірна з доходом, який можна отримати використовуючи їх за призначенням. Відповідно до нормативів капіталізованого рентного доходу для земель сільськогосподарського призначення, земель природно-заповідного та іншого природоохоронного призначення, земель оздоровчого призначення, земель історико-культурного призначення, земель лісогосподарського призначення та земель водного фонду на 1 січня 2020 року [129], повернення земель до землевласника забезпечить економію витрат при зменшенні орендних платежів (табл. 5.10).

Отже, вугледобувне підприємство може зменшити витрати на 3,94 млн грн/рік при виведенні земель з оренди та поверненні їх землевласнику. Це стало можливим завдяки визначенню меж зон підтоплення і відповідно визначення ділянок, які не постраждають після закриття шахти. Розрахунок виконання умови ефективності запропонованого рішення здійснюється без врахування вартості робіт на відновлення (нанесення родючого шару суглинків та чорнозему, доведення балу бонітету до природних значень). Це пов'язано з тим, що на відміну від розробки родовищ корисних копалин відкритим способом, при підземному землі гірничого відводу не мають подібних

порушень земної поверхні, окрім просідань, площі яких та розташування і визначається використовуючи запропоноване програмне забезпечення.

Таблиця 5.10 – Розрахунок економії витрат при поверненні земель землевласникам відповідно до нормативу капіталізованого рентного доходу (варіант 1)

Категорія земель	Норматив капіталізованого рентного доходу, грн/га	Земельні ділянки, що повертаються, га	Сума орендних платежів, грн
Землі сільськогосподарського призначення	27 520	122,21	3363219,2
Землі лісгосподарського призначення	5976	96,55	576982,8
Всього			3940202,0

Варіант 2. Ще одним з напрямів економії витрат є виплата компенсації за пошкоджені землі. Інформація про те, які ділянки будуть підтоплені, дає змогу виплатити компенсацію землевласнику. Компенсація повинна бути співрозмірною ринковій вартості земельних ресурсів, яка визначається за методикою визначення нормативної грошової оцінки земельних ділянок [129].

Нормативна грошова оцінка земельної ділянки (C_n) визначається за формулою:

$$C_n = P_\partial \cdot H_{p\partial} \cdot K_{M1} \cdot K_{M2} \cdot K_{M3} \cdot K_{M4} \cdot K_{цп} \cdot K_{мц} \cdot K_{ні}, \text{ грн,}$$

де P_∂ – площа земельної ділянки, м²;

$H_{p\partial}$ – норматив капіталізованого рентного доходу за одиницю площі;

K_{M1} – коефіцієнт, що враховує розташування громади в межах зони впливу великих міст;

K_{M2} – коефіцієнт, що враховує курортно-рекреаційне значення населених пунктів;

K_{M3} – коефіцієнт, що враховує розташування громади в межах зон радіаційного забруднення;

K_{M4} – коефіцієнт, що характеризує зональні фактори місцеположення земельної ділянки;

$K_{цп}$ – коефіцієнт, що враховує цільове призначення земельної ділянки;

$K_{мц}$ – коефіцієнт, що враховує особливості використання земельної ділянки в межах категорії земель за основним цільовим призначенням;

$K_{ні}$ – добуток коефіцієнтів індексації нормативної грошової оцінки земель за період від затвердження нормативу капіталізованого рентного доходу до дати оцінки.

Норматив капіталізованого рентного доходу для земель сільськогосподарського призначення, земель природно-заповідного та іншого природоохоронного призначення, земель оздоровчого призначення, земель історико-культурного призначення, земель лісгосподарського призначення та земель водного фонду приймається відповідно до методики нормативної грошової оцінки земельних ділянок [129] – [130].

Площі земельних ділянок, які будуть підтоплені та відповідно втрачені для сільськогосподарського обігу становлять 170,42 га. Компенсаційні витрати, які необхідно сплатити землевласнику в наслідок розірвання договорів оренди будуть тотожними до нормативної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення ($K_{вс}$) і складуть:

$$K_{вс} = C_n = 170,42 \cdot 27,52 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot (1,132 \cdot 46) / 46 \cdot 1 = 5835 \text{ тис. грн.}$$

Відповідно до розрахунків, вугледобувному підприємству необхідно виплатити компенсацію за землі, які повернути неможливо у наслідок їх підтоплення, у розмірі 5,835 млн грн.

Площі земельних ділянок, які будуть підтоплені та відповідно втрачені для лісового обігу, становлять 71,7 га.

Компенсаційні витрати, які необхідно сплатити землевласнику в наслідок розірвання договорів оренди будуть тотожними до нормативної грошової оцінки земель лісогосподарського призначення ($K_{вл}$) і складуть:

$$K_{вл} = Ц_n = 71,7 \cdot 5,976 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot (1,132 \cdot 46) / 46 \cdot 1 = 533,54 \text{ тис. грн}$$

Компенсації не підлягають землі з цільовим призначенням «Землі промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони та іншого призначення» (35,03 га), так як вони належать підприємству і «Землі житлової та громадської забудови» (0,5 га), тому що розселення і надання нового житла мешканцям здійснювалось на початку будівництва підприємства в межах гірничого відводу. Отже компенсаційні витрати складуть:

$$K_e = K_{вс} + K_{вл} = 5,835 + 0,534 = 6,369 \text{ млн грн.}$$

Варіант 3. У разі невикористання розробленого програмного забезпечення, а отже і не визначення ділянок, площа яких буде підтоплена, вугледобувне підприємство продовжує сплачувати оренду за ділянки з цільовим призначенням «Землі сільськогосподарського призначення» та «Землі лісогосподарського призначення», загальною площею 460,875 га (292,625 га – сільськогосподарського призначення, 168,25 га – лісогосподарського призначення). Сума орендних платежів залежить від нормативу капіталізованого рентного доходу для земель сільськогосподарського та лісогосподарського призначення. Розрахунок наведено в табл. 5.11.

Отже відповідно до розрахунків, вугледобувне підприємство сплачує грошові кошти за користування земельними ділянками, відносно яких є ризик підтоплення у розмірі 9,058 млн грн.

Встановлено, що у період закриття шахти, внаслідок використання розробленого програмного забезпечення можна досягти економічного ефекту. Порівняння варіантів роботи вугледобувного підприємства під час його закриття наведено у табл. 5.12.

Таблиця 5.11 – Розрахунок суми орендних платежів за користування земельними ділянками відповідно до норм капіталізованого рентного доходу

Категорія земель	Норматив капіталізованого рентного доходу, грн/га	Земельні ділянки, що знаходяться в користуванні, га	Сума орендних платежів, грн
Землі сільськогосподарського призначення	27 520	292,625	8053040
Землі лісгосподарського призначення	5976	168,250	1005462
Всього		460,875	9058502

Таблиця 5.12 – Фінансове навантаження на вугледобувне підприємство під час його закриття, млн грн

Період закриття	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
1 рік	5,118	6,369	9,058
2 рік	5,118	-	9,058
3 рік	5,118	-	9,058
4 рік	5,118	-	9,058
5 рік	5,118	-	9,058
Всього за 5 років	25,59	6,369	45,29

У першому варіанті використовується програмне забезпечення для прогнозування, але виплачується компенсація за неможливості повернення земельних ділянок внаслідок їх підтоплення та повертаються землі, які можна відновити.

У другому варіанті також розглядається ситуація при використанні програмного забезпечення та відповідно прогнозування площ підтоплених земель, але за відмови землевласниками приймати землі, які не можливо

відновити. У цьому випадку сума платежів за оренду ділянок, що знаходяться в зоні ризику буде зменшена на 3,91 млн грн (орендна плата за ділянки, що не будуть підтоплені та вибувають з користування і повертаються до землевласників) та становитиме 5,118 млн грн (9,058 млн грн – 3,91 млн грн). Тобто вугледобувне підприємство буде продовжувати сплачувати внески за оренду ділянок, хоча завдяки розробленому програмному забезпеченню встановлено їх подальшу непридатність для користування за цільовим призначенням, але орендодавцю вигідніше отримувати платежі до кінця дії договору оренди, а не отримати компенсацію.

У третьому варіанті не використовується програмне забезпечення з прогнозування площ підтоплених земель, відповідно виплачуються орендні платежі.

Отже, використання програмного забезпечення прогнозування наслідків закриття вугледобувних підприємств дозволяє визначити площі земель, які будуть підтоплені та які можна повернути до власника, причому це можна зробити вже на початку періоду ліквідації. Цей період може тривати від 5 до 15 років, тобто підійти до питання повернення земель до землевласника можна навіть і через 15 років. Причому, землі знаходяться весь цей час на балансі підприємства, що вимагає, відповідно до договорів оренди, сплачувати внески.

Автором запропоновано три варіанти розвитку подій відносно ділянок земель, які знаходяться в зоні ризику. У випадку не використання програмного забезпечення прогнозування наслідків закриття вугледобувного підприємства (варіант 3), тільки за перші п'ять років необхідно сплатити 45,29 млн грн виплат за договорами оренди. Наступні два варіанти розвитку подій опрацьовано з використання програмного забезпечення. При поверненні земель, які будуть не підтоплені і придатні до відновлення, і відмови власників приймати компенсацію за непридатні ділянки, підприємство має сплатити 25,59 млн грн виплат в сумі за договорами оренди (варіант 1). В наслідок передачі придатних земель до подальшого користування та згоди землевласників отримати

компенсацію, підприємство має сплатити 6,369 млн грн компенсаційних виплат. Найбільш прийнятним є другий варіант.

Отже, розроблений підхід дає змогу спростити процес прийняття рішень керівникам вугледобувних підприємств щодо користування земельними ресурсами на стадії завершення життєвого циклу та землевласникам щодо повернення цих ресурсів.

5.6 Параметрична логістика для автоматизації процесів керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт та їх згорання

Результати дослідження 2, 3 та 5 розділів дозволили обґрунтувати методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля та реалізувати використання послідовності цих моделей для автоматизації процесів керування синхронізацією гірничих робіт та їх згоранням із мінімізацією негативних гідродинамічних явищ. Результати дослідження третього розділу дозволили виконати аналітичне обґрунтування і реалізацію програмного забезпечення побудови тривимірної моделі обводненого шахтного поля для встановлення залежності зміни площі між початковою поверхнею та що осіла, й об'єму між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають, при послідовному вийманні вугільних пластів.

Все це разом дозволило створити параметричну логістику для автоматизації процесів керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт та їх згорання, що спрощує процес прийняття рішень керівництвом вугледобувних підприємств.

У рамках цієї дисертаційної роботи під поняттям «параметрична логістика» розуміється послідовність створення і використання модельного ряду фізико-математичних, фізичних та чисельних комп'ютерних моделей для автоматизації процесу керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт їх згорання, а також спрямованих на прийняття управлінських рішень щодо мінімізації гідроекологічних ризиків (рис. 5.25).

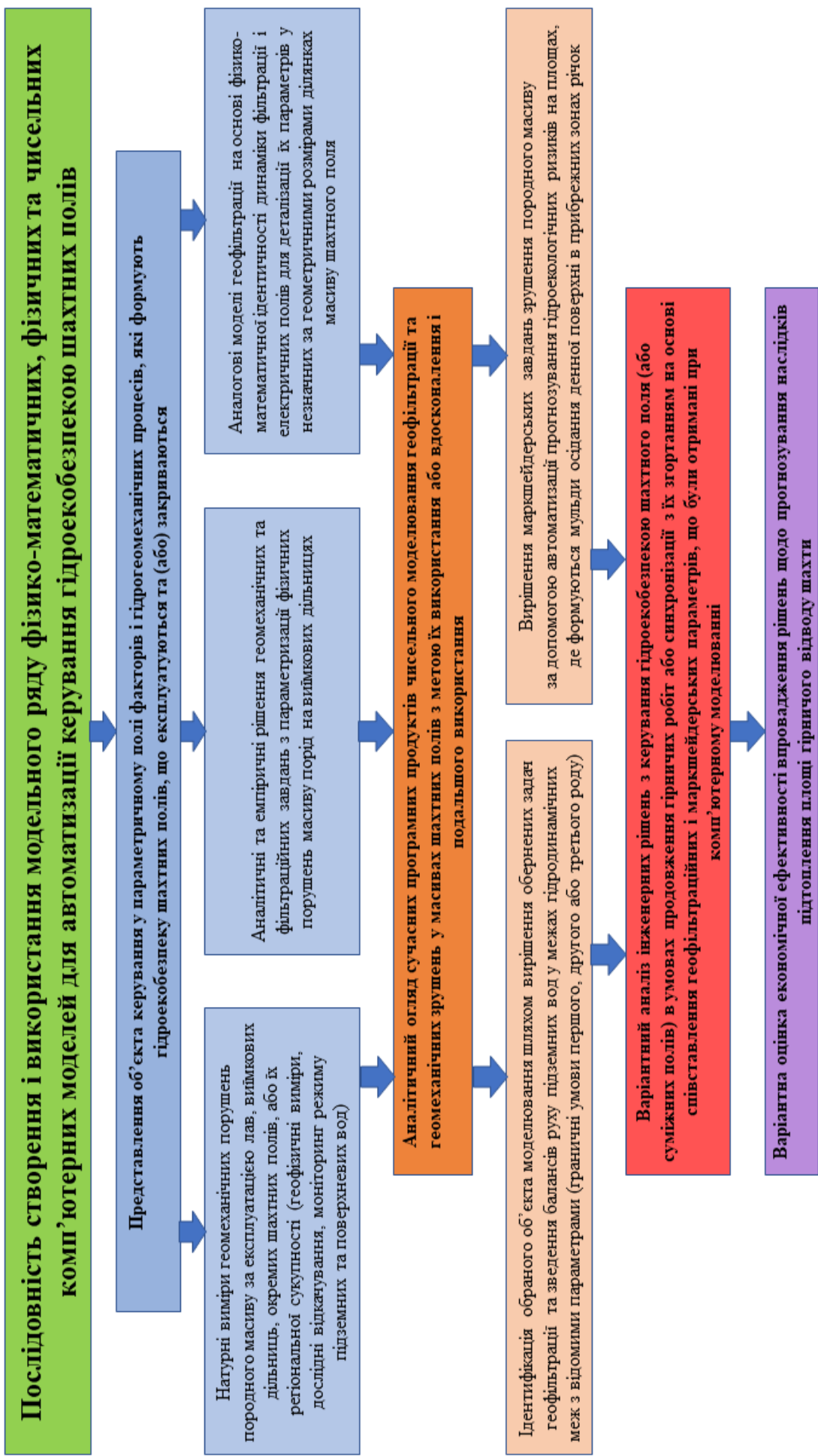


Рисунок 5.25 – Параметрична логістика для автоматизації процесу керування гідрокоробезпекою ведення гірничих робіт і їх згортання

Умовно цю логістичну схему можна поділити на шість етапів.

На першому етапі обґрунтовується уявлення об'єкта керування у параметричному полі факторів і гідрогеомеханічних процесів, які формують гідроекобезпеку шахтних полів, що експлуатуються та (або) закриваються.

На другому етапі проводяться натурні виміри геомеханічних порушень породного масиву за експлуатацією лав, виїмкових ділянок, окремих шахтних полів, або їх регіональної сукупності (геофізичні виміри, дослідні відкачування, моніторинг режиму підземних та поверхневих вод). Виконуються аналітичні та емпіричні рішення геомеханічних та фільтраційних задач з параметризації фізичних порушень масиву порід на виїмкових ділянках. Використовуються аналогові моделі геофільтрації на основі фізико-математичної ідентичності динаміки фільтрації й електричних полів для деталізації їх параметрів у незначних за геометричними розмірами ділянках масиву шахтного поля.

Все це дозволяє на третьому етапі виконати аналітичний огляд програмних продуктів чисельного моделювання геофільтрації та геомеханічних зрушень у масивах шахтних полів з метою їх використання або вдосконалення і подальшого використання.

На четвертому етапі виконується: ідентифікація обраного об'єкта моделювання шляхом рішення обернених задач геофільтрації та зведення балансів руху підземних вод у межах гідродинамічних меж з відомими параметрами (граничні умови першого, другого або третього роду); розв'язання маркшейдерських задач зрушення породного масиву за допомогою автоматизації прогнозування гідроекологічних ризиків на площах, де формуються мульди осідання денної поверхні в прибережних зонах річок.

Все це дозволяє на п'ятому етапі виконати варіантний аналіз інженерних рішень з керування гідроекобезпекою шахтного поля (або суміжних полів) в умовах продовження гірничих робіт або синхронізації з їх згортанням на основі співставлення геофільтраційних і маркшейдерських параметрів, що були отримані при комп'ютерному моделюванні.

На заключному шостому етапі виконується варіантна оцінка економічної ефективності впровадження рішень щодо прогнозування наслідків підтоплення площі гірничого відводу шахтного поля, що спрощує процес прийняття рішень керівництвом вугледобувних підприємств.

Висновки за розділом

1. Створена комп'ютерна геофільтраційна модель Західного Донбасу, яка складає загальну основу локалізації та фрагментації будь-якої іншої модельної ділянки (наприклад, окремого шахтного поля або блока, виїмкової ділянки, технологічного елемента міграції шахтних вод, водозабору питної та технічної води, площі підтоплення та ін.), завжди входить до складу обґрунтувань з прийняття інженерних рішень гідроекобезпеки, з урахуванням критеріїв порушень водообміну, спрогнозованих моделюванням.

2. Комп'ютерне моделювання наслідків закриття шахт «Ювілейна» та «Степова» виконано за чотирима варіантами. Під час ліквідації і затопленні шахт відновлення природного рівня підземних вод на прилеглих площах до стовбура шахти «Ювілейна» відбувається упродовж 5 років – до 2028 р., а біля стовбура шахти «Степова» – до 2027 р. Випереджальне відключення водовідливу шахти «Ювілейна» не призводить до значного зростання шахтних водоприпливів на шахті «Степова» (загалом їх збільшення не перевищує $10 \text{ м}^3/\text{год}$). За найбільш несприятливих умов формування напорів і тріщинуватого розпушення в покрівлі очисних виробок величина приросту шахтних водоприпливів до очисних виробок шахти «Степова», що відпрацьовуються упродовж 2024 року, може сягати $8,0 \text{ м}^3/\text{год}$.

3. Найбільш суттєві зміни рівневого режиму очікуються в межах гідравлічної депресії шахти «Степова» у бучацькому водоносному горизонті. Для цієї ж ділянки характерна й найбільша швидкість відновлення рівнів води як у покривних відкладеннях, так і у вуглепородному масиві. На підроблених ділянках шахтних полів сформовано площі підвищення рівня підземних вод

та підтоплення поверхні в південній частині заплави р. Самара з глибиною залягання рівня 0 – 1,5 м.

4. Вплив закриття і затоплення шахти «Степова» на водоприпливи в шахту «Дніпровська» відсутній. Це обумовлено наявністю в покривних відкладеннях регіональної гідродинамічної межі – р. Самара, а в продуктивній товщі карбону фільтраційного бар'єру у вигляді тектонічного порушення. Зміна природного гідрогеологічного фону заплави р. Самара (у тому числі заказника «Петропавлівські лимани») відбулася в період роботи водовідливу шахти. При затопленні шахти рівні підземних вод в заплаві, як і на площі заказника, відновляться до природного доексплуатаційного положення.

5. Узагальнюючи вищенаведене, слід відзначити екологічність варіанта 1 – плановане доопрацювання балансових запасів шахтами «Степова» і «Ювілейна» з послідовним відключенням водовідливу на шахті «Ювілейна» у грудні 2023 р., на шахті «Степова» – у грудні 2024 р., що призведе до відновлення природних умов зони заказника «Петропавлівські лимани» та наближення території до умов самодренування. Повне відновлення рівня підземних вод першого від поверхні водоносного горизонту упродовж 10 років має відбуватися в моніторинговому режимі з обґрунтуванням і облаштуванням системних заходів водорегулювання.

6. Виконано оцінку економічної ефективності впровадження рішень щодо прогнозування наслідків підтоплення площі гірничого відводу шахти. Запропоновано три варіанти розвитку подій відносно ділянок земель, які знаходяться в зоні ризику. У разі невикористання розробленого програмного забезпечення керування гідроекобезпекою в межах шахтних полів тільки за перші п'ять років необхідно сплатити 45,29 млн грн виплат за договорами оренди. Наступні два варіанти розвитку подій опрацьовано з використанням розробленого програмного забезпечення керування гідроекобезпекою в межах шахтних полів. При поверненні земель, які будуть не підтоплені і придатні до відновлення, і відмови власників приймати компенсацію за непри-

датні ділянки, підприємство має сплатити 25,59 млн грн виплат за договорами оренди. Внаслідок передачі придатних земель до подальшого користування та згоди землевласників отримати компенсацію підприємство має сплатити 6,369 млн грн компенсаційних виплат. Найбільш прийнятним є другий варіант. Отже, розроблений підхід дає змогу спростити процес прийняття рішень керівникам вугледобувних підприємств щодо користування земельними ресурсами на стадії завершення життєвого циклу та землевласникам щодо повернення цих ресурсів.

7. Розроблена параметрична логістика послідовності створення і використання модельного ряду фізико-математичних, фізичних та чисельних комп'ютерних моделей для автоматизації процесів керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт та їх згортання, що спрощує процес прийняття рішень керівництвом вугледобувних підприємств.

8. Достовірність результатів дослідження підтверджується ідентифікацією обраного об'єкта моделювання шляхом вирішення обернених задач геофільтрації та зведення балансів руху підземних вод у межах гідродинамічних меж з відомими параметрами (граничні умови першого, другого або третього роду).

9. Основні результати досліджень за матеріалами п'ятого розділу опубліковано у роботі [2].

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі вперше обґрунтованих гідрогеомеханічних параметрів, що обумовлюють фізичне формування гідроризиків при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт, вирішено актуальне науково-технічне завдання, яке полягає у створенні і впровадженні логістичного ряду фізичних та математичних комп'ютерних моделей геофільтрації на шахтних полях і програмного забезпечення для тривимірного відображення динаміки гірського масиву, земної поверхні та рівневої поверхні підземних вод. Результати роботи у сукупності дозволяють автоматизувати керування гідроекобезпекою шахтних полів при синхронізації вуглевидобутку і згортання гірничих робіт у Західному Донбасі.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. Для адекватного відображення геомеханічних та гідрогеодинамічних процесів з метою керування гідроекобезпекою при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт у Західному Донбасі виконано аналіз програмного забезпечення, що дозволяє створити моделі шахтних полів. Для автоматизації процесів керування гідроекологічними ризиками обґрунтовано необхідність в розробці власного програмного забезпечення менеджера гідроекологічних ризиків, яке дозволить оптимізувати процеси керування, відмовитись від використання стороннього ПЗ (наприклад САМАРА) і значно зменшить час на виконання задач моделювання та обчислення площі затоплення земної поверхні

2. Доведено, що складання методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля з автоматизацією процесу керування гідроекобезпекою конкретизується фізичним моделюванням та емпіріоаналітичними обґрунтуваннями і математичним описом елементів побудови послідовності комп'ютерних моделей.

3. За геофізичними вимірами деформації надвугільної товщі у свердловинах над рухомим очисним вибоєм отримано графіки параметрів деформування гірських порід у часі, які інтерпретовані за класичним рівнянням з ядром Абеля з новим фізичним змістом, як параметри пружно-реологічної піддатливості масиву, що необхідно для тлумачення нелінійності фільтраційних геомеханічних змін у моделях та разом з доказом гідростатичного розподілу напружень у подошві бучацького водоносного горизонту. Це дозволяє використати комп'ютерно-інтегровані технології для моделювання фільтраційних збурень, які спричиняють практично рівномірне переміщення центральних і периферійних точок з об'ємом мульди зсуву, рівним об'єму водовмісного піщаного матеріалу, та сформують нове фізичне уявлення водозахисних функцій масиву.

4. Імітаційний пошук параметрів проникності зони підробки очисним вибоєм здійснено аналоговим моделюванням на резисторній електрогідродинамічній моделі та співставленням результатів з параметрами розтікання води в лаві, що дозволяє дійти висновку про паралельне застосування горизонтальних і зсувних деформацій при інтегруванні чисельних моделей, а математичною основою комп'ютерного моделювання процесу геофільтрації при експлуатації та затопленні шахт є чисельне розв'язання рівняння несталої планової фільтрації за явно-неявною схемою, коли є дотримання потокового балансу по всій області моделі.

5. Вдосконалено обґрунтування гідробезпеки регіонального водоносного горизонту в Західному Донбасі і показано, що навколо розкритої тріщини у гірській породі утворюється захисна зона «зворотний фільтр», з якої вимиваються дрібні фракції піску, а крупні утворюють захисну зону за співвідношенням $d_{50}/d_{10} > 2$, де d_{50} та d_{10} є діаметрами фракцій з відповідним вмістом у водоносному горизонті 50 % і 10 %, що дозволяє підвищити якість геофільтраційної моделі при використанні комп'ютерно-інтегрованих технологій.

6. Розширено уявлення про фізичні параметри підробки водонасичених пісків, коли доступ до вимірів розкриття тріщин відсутній, знайдено емпіріоаналітичне тлумачення логарифмічної лінеаризації залежності між проникністю підробленої товщі порід і кратністю підробки, що з урахуванням отриманих ймовірнісних показників зернового складу буцацького піску дозволило гарантовано виявити існуючий резерв захисних властивостей аргілітів та алевролітів у Західному Донбасі, який дорівнює 3,0.

7. Вперше доведено, що складання методики модельного відображення параметрів масиву шахтного поля з автоматизацією процесу керування гідроекобезпекою конкретизується фізичним моделюванням та емпіріоаналітичними обґрунтуваннями і математичним описом елементів побудови послідовності комп'ютерних моделей.

8. Виконано аналітичне обґрунтування й апробовано методику моделювання опускання земної поверхні при її підробці очисними роботами в умовах шахт Західного Донбасу, при цьому запропоновано математичні моделі побудови поверхонь з регулярною мережею – інтерполяційна і поліноміальна, які дозволяють отримати адекватне уявлення про поверхні, а також вони є базисом для підрахунку об'ємів, наведених у вигляді суми елементарних призм по кожному вузлу мережі, що дозволяє приймати управлінські рішення щодо зменшення фінансового навантаження.

9. Розроблене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати прогнозування гідроекологічних ризиків на площах, де формуються мульди осідання денної поверхні в прибережних зонах річок (Програмне забезпечення моделювання поверхонь виконано на мові Visual C++ під операційну систему Windows з використанням інструментальних засобів відкритої графічної бібліотеки OpenGL).

10. Розроблене програмне забезпечення вирішує задачу спрощення збору, зберігання й обробки даних за допомогою розробленої бази параметрів свердловин, а також дозволяє розрахувати площі між початковою поверхнею, та що осіла і об'єму між рівневою поверхнею водоносного горизонту та

поверхнями, що осідають, при послідовному виїмнанні вугільних пластів в різні періоди, за допомогою модуля «Калькулятор осідань», причому різниця значень показників осідань поверхні складає не більше 6 % у порівнянні з результатами маркшейдерських вимірів і розрахунків при послідовному виїмнанні вугільних пластів, що є параметричним регулятором планування програм гірничих робіт з мінімізацією ризиків гідроекобезпеки разом з використанням аналітичної залежності за поліномом третього ступеня між зміною об'ємів затоплення поверхні за послідовного виїмнанні чотирьох пластів.

11. За допомогою розробленого програмного забезпечення встановлено залежності зміни площі між початковою поверхнею, та що осіла і об'єму між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають, при послідовному виїмнанні вугільних пластів на шахті «Тернівська», які описуються логарифмічною функцією. При цьому площа змінюється в 1,74 рази, а об'єм у 38 раз. Максимальна площа між вихідною й поверхнею, що осіла становить $10,65 \text{ км}^2$, а об'єм між рівневою поверхнею водоносного горизонту та поверхнями, що осідають – $0,0247 \text{ км}^3$.

12. Створено та впроваджено послідовність чисельних комп'ютерних моделей і програмного забезпечення як інструмента автоматизації процесів керування гідроекобезпекою при вуглевидобутку і згортання гірничих робіт шахтних полів у Західному Донбасі.

13. Вперше встановлено, що параметрична логістика автоматизації процесу керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт і їх згортання складається з послідовності геофізичних вимірів деформацій у покрівлі рухомого очисного вибою, які відображають пружно-реологічну динаміку зрушень масиву до поверхні карбону з ядром повзучості Абеля та подальшим сполученням цього результату з геометричними розмірами зони фільтрації у вибої за вимірами на електрогідродинамічній моделі, що дозволяє аналітично узагальнити рівняння керованості технічних систем у вигляді синтезу чисельних моделей геофільтрації і геомеханіки на основі комп'ютерних програм.

14. Вперше встановлено, що комп'ютерне моделювання динаміки опускання поверхні шахтного поля в Західному Донбасі реалізується побудовою поверхонь з регулярною інтерполяційною і поліноміальною мережами, причому просторова інтерполяція ґрунтується на аналітичному виборі моделі поверхні і подальшою її деталізацією локальною інтерполяцією за вимірами навколо кожної точки, а порівняння суми елементарних призм по кожному вузлу мережі з поверхнею ґрунтових вод і водоймищ дозволяє знайти контури площ підтоплення і затоплення у прибережних зонах з описом динаміки їхньої зміни у просторі і часі на скинченно-різницевих багатосарових моделях геофільтрації з відображенням нестационарного гідродинамічного балансу, показники якого є модельними параметрами гідроекопорушень масиву і його стабілізації за варіантним рядом керуючих інженерних рішень.

15. Розроблено рекомендації щодо мінімізації гідроекологічних наслідків затоплення шахт у режимі синхронізації з гірничими роботами.

16. Виконано оцінку економічної ефективності впровадження рішень щодо прогнозування наслідків підтоплення площі гірничого відводу шахти. Запропоновано три варіанти розвитку подій відносно ділянок земель, які знаходяться в зоні ризику. Найбільш прийнятним є варіант, при якому внаслідок передачі придатних земель до подальшого користування та згоди землевласників отримати компенсацію підприємство має сплатити 6,369 млн грн компенсаційних виплат. Розроблений підхід дає змогу спростити процес прийняття рішень керівникам вугледобувних підприємств щодо користування земельними ресурсами на стадії завершення життєвого циклу та землевласникам щодо повернення цих ресурсів.

17. Виконані в дисертаційній роботі дослідження дозволили розробити параметричну логістику послідовності створення і використання модельного ряду фізико-математичних, фізичних та чисельних комп'ютерних моделей для автоматизації процесів керування гідроекобезпекою ведення гірничих робіт та їх згортання, що спрощує процес прийняття рішень керівництвом вугледобувних підприємств.

18. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій дисертаційної роботи підтверджуються: розбіжністю результатів зміни об'ємів затоплення масиву за маркшейдерськими вимірами і моделюванням не більше 6%; ідентифікацією обраного об'єкта моделювання шляхом рішення обернених задач геофільтрації та зведення балансів руху підземних вод у межах гідродинамічних меж з відомими параметрами (граничні умови першого, другого або третього роду).

19. Результати за матеріалами дисертаційної роботи опубліковано в друкованих працях [2], [40], [87] – [92], [97], [114] – [115].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Активізація небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство. Державний інформаційний геологічний фонд України, 2013. 98 с.
2. Садовенко І.О. Фізичні та комп'ютерні моделі у системі керування гідроекобезпекою шахтних полів: монографія / І.О. Садовенко, М.О. Алексєєв, В.С. Власов; М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2023. 191 с.
3. Пасічний В.Г. Геотехногенні основи управління гідросферою при підземному видобутку вугілля: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 21.00.08. Національна гірничо академія України. Дніпропетровськ, 1997. 34 с.
4. Активізація небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП. Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство. Державний інформаційний геологічний фонд України, 2013. 98 с.
5. Стан підземних вод України: щорічник. Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2018. 121 с.
6. Різник Т.О., Захарій Н.В. Аналіз еколого-гідрологічних проблем розробки родовищ вугілля у басейні Самари засобами ПС-технологій // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія Гірничо-геологічна. Випуск 111. Том 1. 2006. С.145 – 153.
7. Іванов Є., Ковальчук І., Терещук О. Геоекологія Нововолинського гірничопромислового району: монографія. Луцьк: Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2009. 208 с.
8. Іванов Є., Кобелька М. Сучасний стан та інтенсивність розвитку процесів просідання і підтоплення в межах Червоноградського гірничо-

промислового району // Вісник Львів. ун-ту. Серія географічна. 2006. Вип. 33. С. 112 – 121.

9. Удалов І.В. Особливості техногенного забруднення підземних вод (з прикладу Світличанського водозабору) // Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». Харків: НТУ «ХПІ». 2005. № 27. С. 115 – 121.

10. Євграфшкіна Г.П. Ставок-накопичувач скидних шахтних вод «Свидівок» у Західному Донбасі та його екологічні проблеми // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. 2003. №5. С. 48 – 53.

11. Садовенко І.О., Рудаков Д.В. Динаміка фільтраційного масопереносу при веденні та згортанні гірничих робіт. Дніпропетровськ. Видавництво НГУ, 2010. 230 с.

12. Проект ліквідації вугільних шахт України. Склад і зміст проекту (зі змінами): СОУ 10.1.05400632.1:2004. Офіц. вид. К.: М-во палива та енергетики України, 2004. 117 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України).

13. Порядок створення режимної мережі на полях шахт, що погашаються. Вимоги до організації спостережень за режимом підземних вод і експлуатації: ГСТУ 101.16461625.001–2003. Офіц. вид. К.: М-во палива та енергетики України, 2003. 32 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України).

14. Тимчасові методичні рекомендації по методах попередньої оцінки змін гідродинамічної обстановки і оптимізації спостережної мережі в системі моніторингу підземних вод в Донбасі при закритті шахт. УкрДГРІ. Дніпропетровськ, 2001. 65 с. (Нормативний документ Мінприроди України).

15. Younger P.L., Banwart S.A. and Hedi, R.S. Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. Kluwer Academic. The Netherlands, 2002. 442 p.

16. Wolkersdorfer C. Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment. Springer, 2008. 465 p.

17. Mine closure and post-mining management. International state-the-art 2008. International Commission on Mine Closure. International Society for Rock Mechanics. ISRM, 2008. 164 p.

18. Goerke-Mallet, Pakzad, Cavdar, Melchers, Mütterthies, Teuwsen, Perl: Innovative Monitoring-Verfahren im Nachbergbau: Überblick, Potentiale, Erfahrungen // Markscheidewesen 2/2017. P. 123 – 131.

19. Sikorski A., Reinersmann N. Altbergbau in Nordrhein-Westfalen // Bergbau – Zeitschrift für Rohstoffgewinnung, Energie, Umwelt. Essen. 2010. Vol. 61 (1), P. 9 – 14.

20. Гідроекозахист вугільних шахтних полів: монографія. під заг. ред. Садовенка І.О./ А.М. Загриценко, Ю.І. Демченко, В.О. Соцков, О.Р. Мамайкін. Дніпро: НТУ «ДП», 2018. 144 с.

21. Техногенез // Словник-довідник з екології: навч.-метод. посіб. / уклад. О.Г. Лановенко, О.О. Остапішина. Херсон : ПП Вишемирський В. С., 2013. С. 174.

22. Гродзинський М. Д. Основи ландшафтної екології. К.: Либідь, 1993. 222 с.

23. Гродзинський М. Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень. К.: Лікей, 1995. 233 с.

24. Геомеханіка навантаження кріплення очисних і підготовчих виробок у шаруватому масиві слабких порід / В.И. Бондаренко та ін. Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2012. 236 с. ISBN 978-966-2575-13-2.

25. Зборщик М.П. Часовий тиск та шляхи зменшення його негативного впливу на стійкість очисних виробок / М.П. Зборщик // Геомеханіка підземної розробки вугільних пластів. 2007. С. 56 – 69.

26. Садовенко І.О., Тимощук В.І. Моделювання механізму гідрогеодинамічного навантаження основної покрівлі вугільних пластів над механізованим кріпленням очисного вибою. Зб. наук. пр. НГУ, 2012. № 39. С. 5 – 11.

27. Скіпочка С.І. Закономірності зміни напружено-деформованого стану породного масиву при інтенсифікації гірничих робіт / С.І. Скіпочка та ін.: Сучасні ресурсо-енергозберігаючі технології гірничого виробництва, 2016. № 2. С. 26 – 40.

28. Четверик М.С., Андрощук К.В. Теорія зрушення масиву гірських порід та управління деформаційними процесами під час підземної виїмки вугілля. Дніпропетровськ: РІА «Дніпро-VAL, 2004. 148 с. ISBN: 966-7616-67-3.

29. Шашенко О.М., Сдвижкова О.О., Гапєєв С.М. Деформованість та міцність масивів гірських порід. Дніпропетровськ: НГУ, 2008. 224 с. ISBN 978-966-350-099-7.

30. Оцінка та прогноз водоприпливів у виробки шахт Західного Донбасу / П.В. Блінов, Є.О. Яковлев, З.Г. Борщ, М.А. Шинкаревский // Вугілля України. 1979. № 1. С. 38 – 39.

31. Режим водоприпливів у гірничі виробки вугільних шахт Західного Донбасу / С.А. Шагоянц, В.А. Григорович, В.А. Приходько та ін. // Вугілля України. 1968. № 2. С. 42 – 43.

32. Проблема підробки заплав річок у Західному Донбасі / І.Г. Лівшиц, Г.Т. Василенко, А.І. Воронкін та ін. // Вугілля України. 1974. №3. С. 8 – 10.

33. Пасічний Г.В. До питання про розрахунок 274 водоохоронних ціликів вугілля при відпрацюванні гідродинамічно відкритих шахтопластів / Г.В. Пасічний, І.О. Садовенко, Ю.І. Демченко // Гірничий інформаційно-аналітичний бюлетень. 1999. № 3. С.73 – 74.

34. Рудаков Д.В. Математичні моделі в охороні навколишнього середовища: Навч. посіб.. Дніпропетровськ. ДНУ, 2004. 160 с.

35. Рудаков Д.В., Садовенко І.О. Прогнозування гідродинамічного режиму при відпрацюванні й затопленні шахтного поля // Вісник ЖДТУ, 2006. № 1 (36). С. 151 – 157.

36. Подвігіна О.О. Про зміни гідрогеологічної обстановки в умовах затоплення шахт Центрального району Донбасу за результатами моделювання

/ О.О. Подвігіна // Збірник наукових праць Українського Державного геолого-розвідувального інституту, 2007. № 3. С 92 – 98.

37. Четверик М.С., Андрощук К.В. Теорія зсуву масиву гірських порід та управління деформаційними процесами при підземній виїмці вугілля. Дніпропетровськ: РІА «Дніпро-VAL», 2004. 148 с.

38. Четверик М.С., Озеров І.Ф. Зсув земної поверхні та геомеханічні процеси в підробленому масиві при розробці пологих пластів вугілля // Геотехнічна механіка: Межвід. зб. наук. пр., 1998. Вип. 9.С. 64 –70.

39. Беженцев В.І., Полосьмак В.Н., Озеров І.Ф. Нові умови та способи маркшейдерських робіт у шахтному будівництві // Вугілля України, 2000. № 2-31. С. 48 – 51.

40. Власов В.С. Автоматизація геолого-маркшейдерського забезпечення для прогнозування гідроекологічних ризиків, які виникають при закритті вугільних шах / М.О. Алексєєв, О.С. Кучін, В.С. Власов // Гірнична електро-механіка та автоматика. НТУ «ДП», 2020. С. 44 – 51.

41. Беседа Н.І. Інформаційний бюлетень про регіональні техногенні зміни екологічного стану геологічного середовища Донбасу під впливом гірничих робіт / Н.І. Беседа, В.О. Сляднєв, Є.О. Яковлєв // ДДП «Геопрогноз». Київ, 1995. 66 с.

42. Охорона підземних вод в умовах техногенезу / М.С. Огняник, А.Б. Ситников, В.К. Рудаков та ін. Київ: Вища школа, 1985. 220 с.

43. Пасічний В.Г. Геотехногенні основи управління гідросферою при підземному видобутку вугілля: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 21.00.08, НГА України. Дніпропетровськ, 1997. 34 с

44. Екологічна безпека вугільних родовищ України / За ред. Г.І. Рудька, О.І. Бондаря. Київ Чернівці: Букрек, 2016. 608 с.

45. Bublikov, A. Automation of the control process of the mining machines based on fuzzy logic / A. Bublikov , V. Tkachov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019. № 3, P. 112 – 118. https://nvngu.in.ua/jdownloads/pdf/2019/03/03_2019_Bublikov.pdf.

46. Bublikov A.V. Automation of the control process by the shearer drum in terms of coal seam hypsometry / A.V. Bublikov, V.V. Tkachov, D.L. Kolosov, G. Gruhler, M.I. Stadnik // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021. № 3. P. 5 – 13.

47. Зеленський О.С., Баран С.В., Лисенко В.С. Автоматизація геолого-маркшейдерського забезпечення в інформаційній системі керування рудним кар'єром / О.С. Зеленський, С.В. Баран, В.С. Лисенко. Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», 2012. 362 с.

48. Ткачов В.В., Яланський О.А. Визначення комплексного амплітудно-частотного показника сигналів геоакустичного контролю плоскопаралельних та блокових структур приконтурного масиву гірських порід // *Зб. наук. пр. НГА України. Дніпропетровськ*, 2000. № 9. Т. 2. С 156 – 162.

49. Фраш Г. Тенденції ГІС на гірничих підприємствах Німеччини / Г. Фраш // *Зб. наук. пр. НГА України. Дніпропетровськ: НГАУ*, 1999. Т.1. № 7. С 15 – 17.

50. Юрчишин В.М. Методика формування баз знань експертних систем для аналізу режимів роботи нафтових родовищ / В.М. Юрчишин, М.М. Яцишин, Л.І. Випасняк // *Нафтогазова енергетика*, 2007. № 1. С. 22 – 26.

51. Яцишин М.М. Математична модель процесу кристалізації однокомпонентних солей у стовбуру експлуатаційної свердловини / М.М. Яцишин, Т.В. Дитко, І.В. Бронівський // *Розвідка та розробка нафтових родовищ*. 2005. 4(17). С.42 – 45.

52. Мухамедієв Р.І. Засоби автоматизації обробки даних геофізичного дослідження свердловин на родовищах урану пластово-інфільтраційного типу / Р.І. Мухамедієв, Я.І. Кучин // *Електронний журнал Cloud of science – Казахстан, Алмати*, 2015. Т.2. № 3. С. 451 – 463.

53. Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model / Christian D. Langevin, Joseph D. Hughes, Edward R. Banta, Richard G. Niswonger, Sorab Panday, and Alden M. Provost, 2017. P. 197. U.S. Geological Survey.

54. Modflow 6 program documentation [Електронний ресурс]: [Веб-сайт].
Режим доступу: <https://modflow6.readthedocs.io/en/latest/#>.
55. FEFLOW 7.1 Documentation [Електронний ресурс]: [Веб-сайт].
Режим доступу: http://www.feflow.info/html/help71/feflow/mainpage.htm#t=02_News%2Fnews.html.
56. Training Manual FEFLOW 7.1 / Groundwater Modelling Centre, 2017.
P.32. DHI WASY GmbH.
57. GMS User Manual (v10.3), 2023. P.1404. Aquaveo.
58. GMS 10.7 Tutorials [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.aquaveo.com/software/gms-learning-tutorials>.
59. ArcGIS for environmental and water issues // William Bajjali. 2018. 371 p. Springer.
60. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS / M. Landa, M. Neteler, S. Gebbert // Environmental Modelling, Software. 2016. N 31. P. 124 – 130.
61. GRASS GIS [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. General overview. What's GRASS GIS – Бонн, 1998 – 2017. Режим доступу: <https://grass.osgeo.org/documentation/general-overview/>.
62. Дубінін М.Ю. Відкриті настільні ГІС: огляд поточної ситуації // Інформаційний бюлетень ГІС-Асоціації / М.Ю. Дубінін, Д.А. Риков, 2009. 5 (72). С. 20 – 27.
63. QGIS By Example / Shammari, M, 2018. 316 p. Packt Publishing.
64. Mastering QGIS - Third Edition / K. Menke, R. Smith, 2019. 420 p. Packt Publishing.
65. QGIS for Hydrological Applications / K. Menke, H. van der Kwast, 2019. 168 p. Local Press.
66. Understanding GIS: An ArcGIS Project Workbook / C. Harder, 2013. 360 p. Esri Press.
67. ILWIS [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. Introduction to ILWIS 3.0. Режим доступу: <https://www.itc.nl/ilwis/users-guide/>.

68. ILWIS 4.4 Academic Guide (2018). ITC - University of Twente. [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.itc.nl/ilwis/academic/ilwis-academic-guide/ilwis44-academic-guide.pdf>.
69. PostGIS in action, second edition / R. O. Obe, L. S. Hsu, 2015. 600 p. Manning Publications.
70. Лабораторія комплексних технологій [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. Самара. Режим доступу: <http://lct.com.ua/ru/samara.php>.
71. Садовенко І.О. Наукові основи управління геофільтраційним станом породного масиву навколо гірничих виробок: дис. ... докт. техн. наук: спец.: 05.15.04, 05.15.11. Дніпр. гірничий ін-т. Дніпропетровськ, 1992. 455 с.
72. Усаченко Б.М. Властивості порід та стійкість гірничих виробок. К: Наук. думка, 1979. 135 с.
73. Овчинніков Н.П. Взаємодія механізованих кріплень із нестійкими бічними породами в умовах шахт Західного Донбасу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец.: 05.15.02. Дніпр. гірничий ін-т. Дніпропетровськ, 1981. 18 с.
74. Молдаванов Є.В. Обґрунтування параметрів очисного виймання в геомеханічних зонах монтажних камер глибоких горизонтів шахт Західного Донбасу: дис. ... канд. техн. наук: спец.: 05.15.02. НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро, 2022. 307 с.
75. Молчанов І.Н., Ніколенко Л.Д. Основи методу скінченних елементів. Київ: Наук. думка, 1989. 272 с.
76. Виноградов В.В. Геомеханіка управління станом масиву поблизу гірничих виробок. Київ: Наук. думка, 1989. 192 с.
77. Коннор Дж., Бреббіа К. Метод скінченних елементів у механіці рідини: Суднобудування, 1979. 263 с.
78. Міхалюк О.В., Храмов І.О., Лисюк Н.А. Формування привибійних зон свердловин вибухом. К: Техніка, 1986. 145 с.
79. Norvatov Y.A., Petrova I.B., Kotlov S.N., Saveliev D. I. Scientific and methodological principles of the analysis and prediction of hydrogeological

conditions of mine abandonment. International mining conference. Vietnam. 2010. pp. 597 – 600.

80. Подвігіна О.О. Обґрунтування параметрів дренавання геомеханічно порушених шахтних полів Центрального району Донбасу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец.: 05.15.09. Нац. гірничий ун-т. Дніпропетровськ, 2008. 18 с.

81. Білокопитова Н.А., Синах В.Ю., Токар М.В., Подвігіна О.О. Особливості моделювання гідрогеологічних умов Донбасу // Збірник наукових праць УкрДГРІ. Київ, 2003. №2. С. 59 – 62.

82. Herus V.A., Ivanchuk N.V., Martyniuk P.M. A System Approach to Mathematical and Computer Modeling of Geomigration Processes Using Freefem++ and Parallelization of Computations. Cybernetics and Systems Analysis. 2018. Vol. 54, No. 2. P. 284 – 294.

83. Ксенда І.М. Підробка поверхневих водних об'єктів у Донбасі. К.: Техніка, 1982. 118 с.

84. Василенко Г.Т. Дослідження поширення сполучених тріщин у підроблюваній товщі порід люмінісцентним методом з метою встановлення глибини розкряювання вугільних пластів під пливунами в Західному Донбасі: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Дніпропетровськ, 1968. 17 с.

85. Дрибан В.А. Особенности деформирования массивов горных пород ЦРД при многократной долгосрочной подработке / В.А. Дрибан, Н.Н. Грищенко, Н.А. Дуброва / Форум гірників 2013: матер. міжнар. конф. Дніпропетровськ, 2013. Том 2. С. 226 – 232.

86. Lautsch H. Über die Kinematik der Bodenbewegungen beim Abbau mehrerer flacher Flöze innerhalb eines tektonischen Bereiches / H. Lautsch // Clausthal.1971. N 4. P.121 – 146.

87. Vlasov V. Simulation of Rock Convergence in a Longwall / A.A. Sidelnikov, V.S. Vlasov, V.E. Valyushko // The 6th international forum for students and

young researches «Widening our horizon» Volume 2.D. (Dnepropetrovsk, April 14 –15); National Mining University, 2011. P. 53-54.

88. Власов В.С. Обґрунтування параметрів об'ємного моделювання масиву гірських порід навколо очисних і підготовчих виробок / С.Ф. Власов, В.С. Власов // Науково-технічний збірник «Розробка родовищ 2015» Д.: НГУ. Літограф, 2015. С. 367 – 375.

89. Власов В.С. Обґрунтування методики тривимірного моделювання деформації земної поверхні при виїмці вугільних пластів на шахтах Західного Донбасу / М.О. Алексєєв, В.С. Власов // Modern Movement of Science: abstracts of the 10th International Scientific and Practical Internet Conference (Dnipro, April 2-3), 2020. P. 27 – 30.

90. Власов В.С. Моделювання опускання земної поверхні при закритті вугільних шахт. / М.А. Алексєєв, В.С. Власов // III Міжнародна конференція «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості». Збірник наукових праць № 3. (м. Дніпро, 23 – 24 листопада 2017); НТУ Дніпровська політехніка, 2017. С. 116 – 117. ISBN 978-966-350-692-0.

91. Власов В.С. Система підтримки прийняття рішень для мінімізації гідроеколого-економічних ризиків при підробці поверхні гірничими виробками / М.О. Алексєєв, В.С. Власов // Матеріали науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 22 – 24 травня 2019); ДВНЗ Криворізький національний університет, 2019. С. 126. <https://shorturl.at/gpsx0>.

92. Vlasov V. Models and information systems of ecological and economical risks with decision making on the closure of coal mines / M. Aleksieiev, V. Vlasov // Фізико-хімічні геотехнології – 2018: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, (м. Дніпро, 10 – 11 жовтня 2018); НТУ Дніпровська політехніка, 2018. 68 с.

93. Loffler M. Triangulating the square and squaring the triangle: quadrees and Delaunay triangulations are equivalent / M. Loffler, W. Mulzer // SODA'11,

Proceedings of the Twenty-second Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms. 2011. P. 1759 – 1777.

94. Shewchuk J. R. Two-dimensional Delaunay triangulations [Electronic resource] / J. R. Shewchuk // Lecture notes on Delaunay mesh generation, Berkeley. 2012. P. 25 – 43. Mode of access: <http://www.cs.berkeley.edu/~jrs/meshpapers/delnotes.pdf>. – Title from the screen.

95. Altaeva A. Method for creating a 3D model of the field with the use of geoinformation technologies / A. Altaeva, S. Sedina, A. Baltieva // Journal of Geography and Environmental Management, Almaty, 2017. No. 45. P. 94 – 102.

96. Rotz M. 3D geologic modelling and mine planning to improve quarry and plant efficiency at cement operations / M. Rotz, R. Trynoski // 2018 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA), Nashville, 2018. P. 1 – 8.

97. Vlasov V.S. Modeling of the earth's surface subsidence during its undermining by stoping in coal mines / A.S. Zelensky, V.S. Lysenko, M.A. Alekseyev, V.S. Vlasov // Naukovyi Visnyk NGU, 2020. C. 121 – 127. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/121>.

98. Automation of full estimation of reserves in ore deposits / A.S. Zelensky, S.V. Baran, V.S. Lysenko, I.V. Khivrenko // Scientific Bulletin of Kryvyi Rih Technical University. Collection of scientific works, Kryvyi Rih: KNU. 2010. № 26. P. 64 – 68.

99. Gordon Scott V. Computer Graphics Programming in OpenGL with C++ / V. Scott Gordon, John L. Clevenger // Stylus Publishing, 2018. 384 p.

100. Raymond C.H. OpenGL Data Visualization Cookbook / C.H. Raymond, C.Y. William // Packt Publishing LTD, 2015. 298 p.

101. Börner K, Polley D.E. Visual Insights: A Practical Guide to Making Sense of Data, MIT Press, 2014. 312 p.

102. Crispin L., Gregory J. Agile Testing: A Practical Guide for Testers and Agile Teams. – Addison Wesley Professional, 2009. 533 p.

103. Faizrakhmanov R.A., Dolgova E.V., Rakhmanov A.A. Zadacha adaptiv-nogo upravleniia nasosnym oborudovaniem na osnove intellektual'nykh tekhnologii

[The issue of the pumping equipment adaptive control on the basis of intellectual technologies]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 11. P. 17 – 19.

104. Petrochenkov A.B., Kychkin A.V., Temichev A.A. Integriruvannaia diagnosticheskaia podderzhka raspredelennoi sistemy monitoringa energodannykh [Integrated diagnostic support of distributed data monitoring system]. *Avtomatizatsiia i sovremennye tekhnologii*, 2014. no. 9. P. 10 – 16.

105. Bawden D., Holtham C., Courtney N. Perspectives on information overload // *Aslibproceedings*, 1999. Vol. 51(8). P. 249 – 255.

106. 103. Burton G.F., Tuttle B. Market behavior under information overload conditions: Evidence from the laboratory. Lincoln, Nebraska: University of Nebraska, 2005. 314 p.

107. Druzzdel M.J., Flynn R.R. Decision Support Systems // Bates M. J, Maack M. N. (eds.). *Encyclopedia of Library and Information Science*. NY: Taylor & Francis, Inc., 2010. 276 p.

108. Eisenhardt K.M. Making fast strategic decisions in high-velocity environments // *Academy of Management Journal*, 1989. Vol. 32(3). P. 543 – 576.

109. Date C.J. *An Introduction to Database Systems / C. J. Date // 8th Edition*, Addison–Wesley, 2003. 1034 p.

110. Коннолли Т. Базы даних. Проектування, реалізація та супровід. Теорія та практика: Пер. з англ. / Т. Коннолли, К. Бегг: Видав. дім «Вільямс», 2003. 1440 с.

111. Роланд Ф.Д. Концепція баз даних: Пер. з англ. / Ф.Д. Роланд: Видав. дім «Вільямс», 2002. 256 с.

112. ДСТУ 28764-94. Системи обробки інформації. Базы і банки даних. Основні терміни та визначення. – К.: Держстандарт, 1994. 32 с.

113. Kessenich, J., Sellers, G., & Shreiner, D. *OpenGL Programming Guide: The official guide to learning OpenGL, version 4.5 with SPIR-V, Ninth edition*. Boston: Addison-Wesley Professional. 2016. 319 p.

114. Власов В.С. Автоматизація процесу керування гідрокобезпекою при синхронізації вуглевидобутку і згортання гірничих робіт шахтних полів /

В.С. Власов // Міжнародна наукова інтернет-конференція «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення», (Тернопіль, Україна – Перевоськ, Польща), 6 – 7 липня 2023), 2023. С. 10 – 11. <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-1240/>.

115. Власов В.С. Комп'ютерне моделювання у системі керування гідроекобезпекою шахтних полів / В.С. Власов // The 5th international scientific and practical internet conference «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates»: Ukraine, Dnipro, august 3 – 4, 2023. P. 137 – 138. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2023/08/>

116. Соляков І.П., Суярко А.В., Чабан Д.І. Геологічний звіт про детальну розвідку Петропавлівських №№ 1, 2, 3 і Брагіновської № 1 ділянок та перспективну розвідку Петропавлівсько-Межівського району / Трест Артемвуглерозвідка. Артемівськ, 1962. 122 с. (Фонди Придніпровської ГДП. Інв. № 73).

117. Васік В.І., Штаковська О.Я. Геологічний звіт про дорозвідку поля шахти Західно-Донбаська № 55. Книга 1 / Геологорозвідувальна партія. – Павлоград, 1973. 116 с. (Фонди Придніпровської ГДП. Інв. № 835).

118. Корнелюк Д.А. Звіт про гідрогеологічні дослідження на полі шахти «Західно-Донбаська» № 6/42 з метою вивчення умов обводнення пласта С_{7Н} у зоні Богданівського скиду. Том 1. / Трест «Укрюжгеологія». Павлоград, 1977. 142 с. (Фонди Придніпровської ГДП. Інв. № 1077).

119. Рубан С.А., Шинкаревський М.А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України: монографія. К.: УкрДГРІ, 2005. 572 с.

120. Заезжева О.О., Толокольникова Л.Л., Погребной Ю.П. Оцінка запасів прісних вод західних околиць Донбасу в межах Дніпропетровської та Харківської областей (1976 – 1978 рр.). Звіт / Трест «Укрюжгеологія», тематична партія Новомосковської ГРЕ. Дніпропетровськ, 1978. 127 с. (Фонди ДВ УкрДГРІ. Інв. № 801).

121. Звіт «Про гідрогеологічні дослідження на полі шахти «Західно-Донбаська» № 6/42 (ім. Героїв Космосу) з метою вивчення умов обводнення пласта С₇^н в зоні Богданівського скидання. Павлоград, 1977. 143 с.

122. Висновок про результати робіт з вивчення умов обводненості зон тектонічних порушень Західного Донбасу (Павлоградсько-Петропавлівський вуглепромисловий район). Павлоград, 1983. 132 с.

123. Розробка ефективних гідродинамічних схем прогнозування та управління фільтрацією підземних та поверхневих вод у межах шахт «Самарська» та «Західно-Донбаська» на основі гідродинамічних моделей / І.О. Садовенко, О.М. Загриценко, О.О. Подвигіна, В.І. Тимощук // Звіт НДР № 040827/14-29/92-У. Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ», 2014. 104 с.

124. Спеціальний проект проведення відкаточного квершлягу пл. С₁₀¹ шахти «Самарська» у небезпечній зоні Богданівського скиду, авторський нагляд та моніторинг ускладнюючих факторів при проведенні відкаточного квершлягу / О.М. Шашенко, І.О. Садовенко, С.М. Гапєєв, В.І. Тимощук та ін // Звіт НДР № 050402. Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ», 2015. 238 с.

125. Садовенко І.О., Демченко Ю.І., Улицький О.А. Оцінка геомеханічної стійкості міжшахтних ціликів. Зб. наук. пр. НГУ, 2003. Т.1, № 17. С. 40 – 43.

126. Садовенко І.О., Рудаков Д.В. Динаміка фільтраційного масопереносу при веденні та зсіданні гірничих робіт. Дніпропетровськ. Видавництво НГУ, 2010. 230 с.

127. Інформаційний звіт про результати режимних гідрогеологічних спостережень по відомчій мережі спостережних свердловин ПАО «ДТЕК Павлоградвугілля» (за результатами робіт 2019 р.) // С.В. Держак, А.В. Тарасевич. КП «Південукргеологія» м. Павлоград, 2020. 115 с.

128. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Ч.1 Проектування; Ч.2 Будівництво. Мінрегіон України. ДП «Укрархбудінформ», 2015. 113 с.

129. Про затвердження Методики нормативної грошової оцінки земельних ділянок. Постанова КМУ. URL: Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show /1147-2021-%D0%BF#Text>.

130. Про індексацію нормативної грошової оцінки земель за 2022 рік. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру. URL: Режим доступу: <https://land.gov.ua/pro-indeksatsiiu-normatyvnoi-hroshovoi-otsinky-zemel-za-2022-rik/>.

ДОДАТОК

**ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**



Затверджую:

Директор з наукової роботи
 І.О. Садовенко «Дніпровська політехніка»
 Ігор НІКІТЕНКО
 «14» _____ 09 _____ 2023 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

науково-практичних розробок дисертаційної роботи Власова В.С. на тему «Математичні моделі для автоматизації процесу керування гідрокобезпекою при синхронізації вуглевидобутку та згортання гірничих робіт у Західному Донбасі»

Комісія у складі: Гапєєва С.М., д.т.н., проф., директора НДЦ «Гідрогеомеханіки і термодинаміки геотехнічних систем»; Садовенка І.О., д.т.н., г.н.с., наукового керівника НДЦ «Гідрогеомеханіки і термодинаміки геотехнічних систем»; Загриценко А.М., д.т.н., доц., зав. кафедри гідрогеології та інженерної геології свідчить, що при виконанні науково-дослідної роботи 040844-21 «Гідрогеологічний прогноз наслідків ліквідації шахт «Ювілейна» та «Степова» ВСП «ШУ Першотравенське» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» у термін 12.03.2021 – 31.12.2021 були надані здобувачем Власовим В.С. і впроваджені науково-практичні розробки, які полягали у наступному:

1) Інтерфейс та інтеграція рішень авторської програми моделювання тривимірного простору обводненого масиву суміжних шахтних полів, суміщеної з використанням ліцензійних програм чисельного моделювання гідродинамічних (Visual MODFLOW) та геомеханічних (Phase 2) процесів.

2) Моделюванням встановлено, що при відновленні рівнів підземних вод з урахуванням осідання підроблених ділянок формуються площі затоплення і потенційного підтоплення денної поверхні (глибина залягання рівня підземних вод до 1,5 м), які охоплюють південну частину заплави р. Самара, при цьому ділянка прогнозованого затоплення і підтоплення була здренована під дією шахтного водовідливу, а зміна природного гідрогеологічного фону південної ділянки заплави річки Самари, в тому числі заказника «Петропавлівські лимани», відбулася в період роботи водовідливу шахти. При затопленні шахти рівні підземних вод в заплаві, в т.ч. і на площі заказника, відновлюються до природного доексплуатаційного положення.

3) Показано, що для запобігання підтоплення автошляху та частини селища Миколаївка можливе довготривале підтримання стаціонарного водовідливу у блоці І ш. «Степова» на горизонті 145 м. За цим варіантом забезпечується стале положення рівнів підземних вод як у вуглепородному масиві, так і водоносному комплексі мезокайнозойських відкладень, що дозволяє зберегти існуючий рівневий режим в межах заплави р. Самара. При цьому робота стаціонарного водовідливу ефективна за умов збереження дренального впливу капітальних гірничих виробок на горизонті 145 м.

4) Доведено, що при застосуванні занурювальних насосів у стовбурі шахти «Степова» значного ефекту від їх роботи не спостерігається, що пов'язане з нівелюванням гідродепресії лінійної дрени при її затопленні. Це означає, що магістральні і підготовчі виробки втрачають дренальні функції.

Підписи:

Сергій Гапєєв

Іван Садовенко

Аліна Загриценко

Дніпро – 2023